



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VLIV ZANÁŠENÍ SVAZKU TRUBEK V KOTLI NA JEHO
ŽIVOTNOST**

THE EFFECT OF BOILER TUBE BUNDLE FOULING ON ITS SERVICE LIFE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Volná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Nad'

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Studentka: **Bc. Kateřina Volná**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Nadř**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv zanášení svazku trubek v kotli na jeho životnost

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zanášení trubkových svazků v kotlích na straně spalin je problém způsobující snížení tepelného výkonu, životnosti a nárůst nákladů na údržbu zařízení. Je proto nutné ho minimalizovat, v ideálním případě eliminovat. Tento typ poškození je silně závislý na složení a typu paliva, geometrii kotle a provozních podmínkách. S využitím moderních simulačních softwarů lze na základě tvaru a složení nánosů určit teplotní pole ve stěně trubky, tepelný výkon a životnost trubky v daných podmínkách.

Cíle diplomové práce:

- 1) Seznámit se s problematikou poškozování kotlů se zaměřením na zanášení teplosměnných ploch
- 2) Příprava geometrie pro numerické analýzy
- 3) Simulace charakteru proudění v oblasti trubkového svazku kotle pomocí CFD
- 4) Určení poškození kritických částí trubkového svazku vlivem teploty s využitím MKP
- 5) Hodnocení vlivu zanášení na životnost trubky a tepelný výkon trubkového svazku

Seznam doporučené literatury:

FLYNN, Daniel J., Robert D. PORT a NALCO CHEMICAL COMPANY, ed. The nalco guide to boiler failure analysis. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-174300-6.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, ed. VDI heat atlas. 2. ed. Heidelberg: Springer, 2010. Springer reference. ISBN 978-3-540-79999-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Zanášení trubkových svazků v kotlích na straně spalín, ovlivňuje nejen životnost, ale i tepelný výkon kotle a způsobuje růst nákladů na jeho údržbu a provoz. Je proto snaha tento proces minimalizovat nebo úplně odstranit. Tato práce se zaměřuje na porovnání životnosti a tepelného výkonu u nezaneseného a zaneseného trubkového svazku v kotli určeném na spalování černého uhlí. Jsou zde provedeny simulace proudění spalín v oblasti zaneseného a nezaneseného trubkového svazku kotle pomocí programu ANSYS Fluent, ze kterých vyplývá, že povrch trubkových svazků s nánosem je zahříván mnohem méně než povrch bez nánosu. Teplotní zatížení trubek získané z CFD analýzy, jsou následně aplikována na model vytvořený v programu ANSYS Mechanical, ve kterém je proveden výpočet teplotního pole na řezu jednotlivých trubek. Pomocí výsledků simulace je následně provedeno hodnocení vlivu zanášení na creepovou životnost a tepelný výkon. Z výsledků je patrné, že zanášení prodlužuje creepovou životnost, avšak rapidně snižuje tepelný výkon silně zanesených trubek. Následně do dalších částí svazků proudí spaliny o vyšší teplotě a životnost trubek v dalších svazcích tak bude pravděpodobně snížena.

Abstract

Fouling of tube bundles in boilers on the flue gas side affects not only the service life, but also the boiler heat output and increases maintenance and operating costs. Therefore, it is necessary to minimize or completely eliminate this process. This thesis focuses on comparison of the service life and the heat output of the tube bundles with and without deposit in the coal fired boiler. Simulations of flue gas flow in area of tube bundles with and without deposit are performed using ANSYS Fluent software, which shows that the surface of tube bundles with deposit is much less heated than the surface without deposit. The thermal loads of tubes obtained by the CFD analysis are applied to the model, which is created in the program ANSYS Mechanical, where the calculation of the temperature field in the cross section of the pipe is realized. The effect of fouling on creep life and heat output is then evaluated based on simulation results. The results show that fouling increases creep life, but significantly reduces heat output of heavily fouled tubes. Hence the flue gas flows at a higher temperature to the rest of the tube bundle, and the service life of those tubes will therefore probably decrease.

Klíčová slova

Trubkový svazek, kotel, CFD, MKP, zanášení, creep, tepelný výkon, teplotní pole

Key words

Tube bundle, boiler, CFD, MKP, fouling, creep, heat output, thermal field

Bibliografická citace

VOLNÁ, K. *Vliv zanášení svazku trubek v kotli na jeho životnost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Nadř.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv zanášení svazku trubek v kotli na jeho životnost* vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Martina Nadě a že všechny podklady jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

Kateřina Volná

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu Ing. Martinu Naďovi, za odborné vedení diplomové práce, věnovaný čas a ochotu pomoci s formou i obsahem. Dále bych chtěla poděkovat vyučujícím za cenné rady. A v neposlední řadě také rodině, příteli a blízkým za podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

Obsah

1 Úvod.....	3
1.1 Cíle práce	3
2 Úvod do problematiky kotlů.....	4
2.1 Klasifikace kotlů	4
2.2 Základní součásti kotle	4
2.2.1 Spalovací zařízení	5
2.2.2 Výměňíková část.....	6
2.3 Poškozování kotlů.....	6
2.3.1 Poškození výrobou.....	7
2.3.2 Poškození provozem	7
2.3.3 Teplotní poškozování.....	7
2.3.4 Korozní poškozování	8
2.3.5 Poškozování prouděním.....	8
3 Proces zanášení.....	10
3.1 Mechanismy zanášení.....	10
3.1.1 Vlastní setrvačnost částic	10
3.1.2 Termofořeze	11
3.1.3 Kondenzace	12
3.1.4 Chemická reakce	13
4 Simulace charakteru proudění.....	14
4.1 Úvod do modelování procesu zanášení	14
4.2 Dosavadní poznatky analýz různých autorů	14
4.2.1 Modelování zanášení dle J. Tomeczeka a K. Wacłaeiaka	14
4.2.2 Modelování zanášení dle P. Venturiniho, D. Borella, K. Hanjalića a F. Rispoliho.	17
4.2.3 Modelování zanášení dle M. G. Péreze, E. Vakkilainena a T. Hyppänenena	20
4.2.4 Modelování zanášení dle L. Mu, Q. Qiu, J. Chen, H. Yin, A. Li a X. Chi.....	23
4.3 Simulace proudění pro určení teplotního zatížení a součinitelů přestupu tepla	26
4.3.1 Popis použitých programů	26
4.3.2 Důpočet vstupních hodnot materiálových charakteristik.....	27

4.3.3 Model domény a jeho síť	28
4.4 Výpočet proudění	31
5 Určení poškození kritických částí vlivem teploty	33
5.1 Model trubky a síť	33
5.2 Teplotní analýza	33
6 Výpočet creepového poškození dle normy EN 12952-4	38
6.1 Teplotní zatížení a creepová životnost na jednotlivých trubkách.....	39
6.2 Vyhodnocení creepového poškození	45
7 Porovnání tepelných výkonů	46
7.1 Vyhodnocení tepelného výkonu	46
8 Závěr.....	49
Seznam zdrojů	51
Seznam obrázků	53
Seznam použitých symbolů	57
Příloha A	59
Příloha B.....	63
Příloha C	65
Příloha D	67

1 Úvod

Proces zanášení je jedním z nejvýznamnějších problémů, způsobující poškození kotlů, které jsou již několik desetiletí využívány ke spalování paliva a tvorbě tepelné energie. S industrializací došlo k velkému rozvoji těchto zařízení a v dnešní době existuje rozsáhlý sortiment různých spalovacích zařízení, sloužících především k výrobě tepelné energie, která je dále využívána pro různé účely, například na vytápění budov nebo na tvorbu elektrické energie. Kotle lze nalézt v různých oblastech průmyslu, jako například v chemickém, energetickém nebo petrochemickém.

Současná zařízení jsou schopna spalovat různé druhy paliva, které můžeme rozdělit na tuhé (černé uhlí, hnědé uhlí, dřevo, odpad atd.), kapalné (benzín, motorová nafta, petrolej atd.) a plynné (zemní plyn, LPG, vodík atd.). V posledních letech se začínají hojně využívat kapalná a plynná paliva, která mají velkou výhřevnost, avšak jejich cena je stále poměrně vysoká, a proto v průmyslové praxi stále převládají tuhá paliva, která mohou způsobovat různá poškození kotlů a jedním z nich je právě zanášení.

K tvorbě nánosů dochází usazováním pevných částic spalin na funkčních plochách kotle. Vzniklý nános velmi ovlivňuje nebo dokonce zabraňuje správnému provozu zařízení. Dochází ke snížení jeho účinnosti a navýšení nákladů na provoz a údržbu. V případě příliš silného nánosů je obvykle potřeba kotel odstavit a vyčistit.

1.1 Cíle práce

Problematickou zanášení trubkových svazků se v poslední době zabývá celá řada autorů. Tato práce se zaměřuje na porovnání životnosti a tepelného výkonu zanesených a nezanesených trubkových svazků v kotli určeném na spalování černého uhlí. Po vytvoření reálné geometrie bude provedena simulace proudění spalin v okolí svazků trubek, za účelem zjištění teplotního zatížení na povrchu jednotlivých trubek a také koeficientů přestupů tepla. Dále bude provedena MKP analýza, jejíž úkolem bude zjistit tepelné toky trubkových svazků a teplotní pole na řezech jednotlivých trubek. Výsledná data lze dále použít pro výpočet zbytkové životnosti jednotlivých trubek a následné porovnání životností a tepelných výkonů zanesených a nezanesených trubkových svazků. Hlavní cíle této práce je možné shrnout do následujících bodů:

1. Literární rešerše zaměřující se na problematiku poškození kotlů zanášením
2. Příprava geometrie pro numerické analýzy
3. Simulace charakteru proudění v okolí trubkových svazků pomocí CFD
4. MKP analýza poškození kritických částí trubkových svazků
5. Hodnocení vlivu zanášení na životnost a tepelný výkon

2 Úvod do problematiky kotlů

Kotle byly využívány od osmnáctého století téměř po celém světě. S následnou industrializací došlo k jejich velkému rozvoji. Vznikla zařízení různých velikostí, mající všestranné využití a dobrou spolehlivost. Tato zařízení se používají v řadě aplikací, převážně k ohřevu vody, produkci páry a výrobě energie. Dochází v nich k přeměně chemické energie paliva na tepelnou energii nebo přeměně tepelné energie odpadních plynů na tepelnou energii páry. [1, 2]

Kotle jsou obvykle popsány pomocí čtyř nejdůležitějších vlastností a typem paliva, které je spalováno. Udává se vstupní teplota napájecí vody, množství protékající páry, výstupní tlak a výstupní teplota. Typ paliva se udává, protože má velký vliv na velikost a tvar kotle. Obvykle je žádoucí, aby mohlo být využíváno více druhů paliv, protože to umožňuje majitelům optimalizovat náklady. Existuje mnoho druhů těchto zařízení a lze je klasifikovat dle několika kritérií. [1]

2.1 Klasifikace kotlů

Kotle jsou dostupné v široké škále velikostí a tvarů. Jejich konstrukce se liší také dle výsledného použití. Tato zařízení lze rozdělit například podle použití, provozního tlaku, typu konstrukce, paliva, způsobu spalování, typu proudění atd. [1–3]

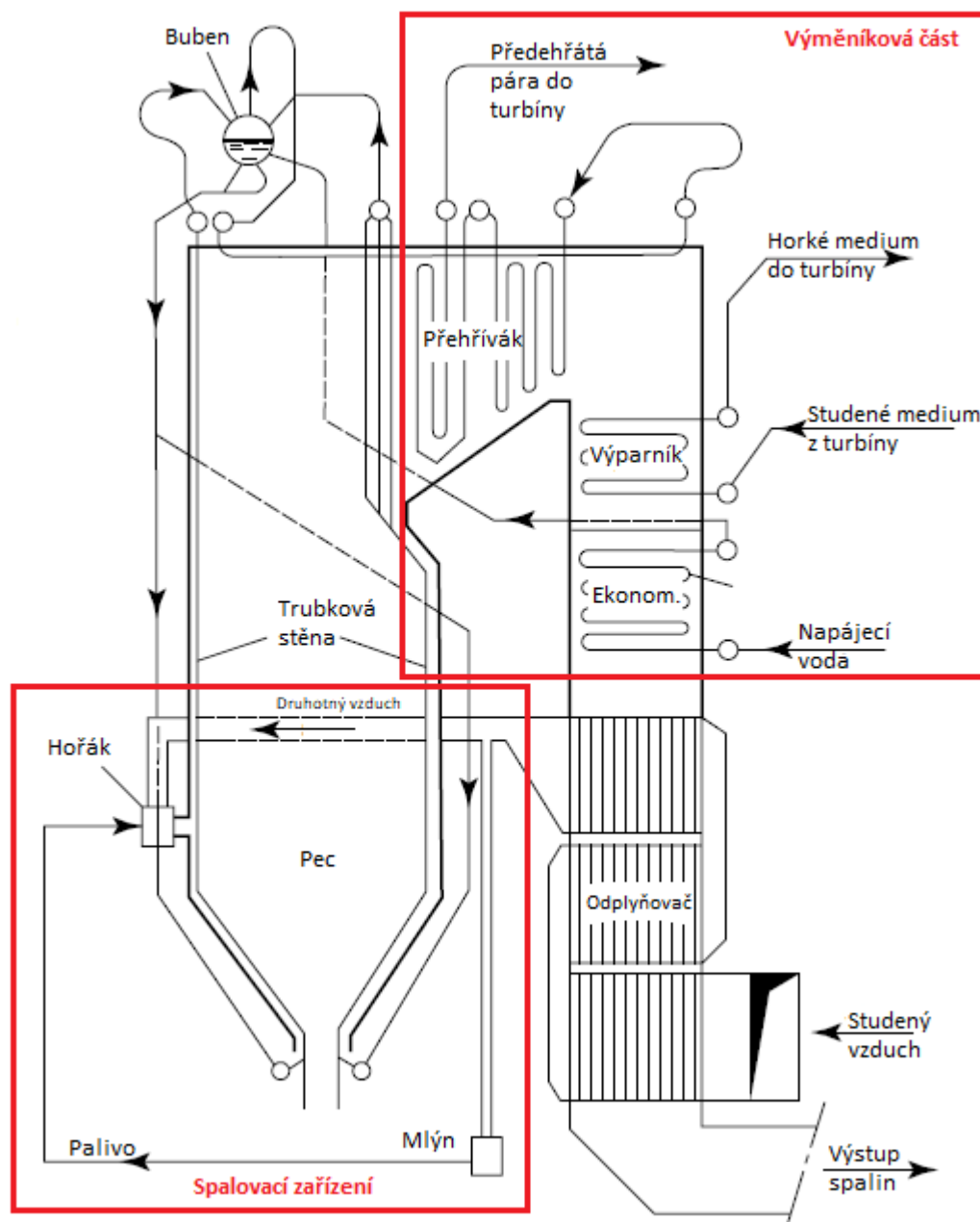
Jedno ze základních dělení kotlů je podle toho, co protéká trubkami kotle. Existují tři typy:

- Vodotrubné, kde trubkami protékají spaliny a vně proudí voda.
- Žárotrubné, v nichž voda proudí uvnitř trubek a vně spaliny.
- Kombinované, ve kterém proudí voda i spaliny uvnitř i vně trubek.

V případě, že spaliny proudí uvnitř trubek, je nutné využívat čistá paliva, jako jsou oleje a plyny, jinak dochází k zanášení a erozi. Kombinované kotle obvykle spalují tuhá paliva, ale pouze v omezeném rozsahu. Oba typy zařízení jsou limitovány velikostí, přehřátím i tlakem, a proto mají omezený rozsah použití. Tato práce se bude dále věnovat především zařízením, která jsou nejběžněji využívána, a to těm, ve kterých uvnitř trubek proudí voda a spaliny jsou na vnější straně trubek. Tento druh kotlů má určitá úskalí a dochází v něm k mnoha druhům poškození. [1, 2]

2.2 Základní součásti kotle

Kotel se skládá ze dvou základních částí, a to ze samotného spalovacího zařízení s příslušenstvím a výměníkové části kotle. Ve spalovacím zařízení se nachází spalovací komora, ve které dochází k hoření. Příslušenství spalovacího zařízení zajišťuje dávkování paliva a vzduchu, ohřev vzduchu a likvidaci zbytků po spálení. Další část tvoří tlakový systém, který obsahuje ekonomizér, výparník, předhřívák páry, napájecí nádrž, oběhová čerpadla, kondenzátor a úpravnu vody. Nedílnou součástí kotle jsou zařízení zajišťující regulaci a měření pro správný chod kotle. [3]



Obrázek 1: Základní součásti kotle [1]

2.2.1 Spalovací zařízení

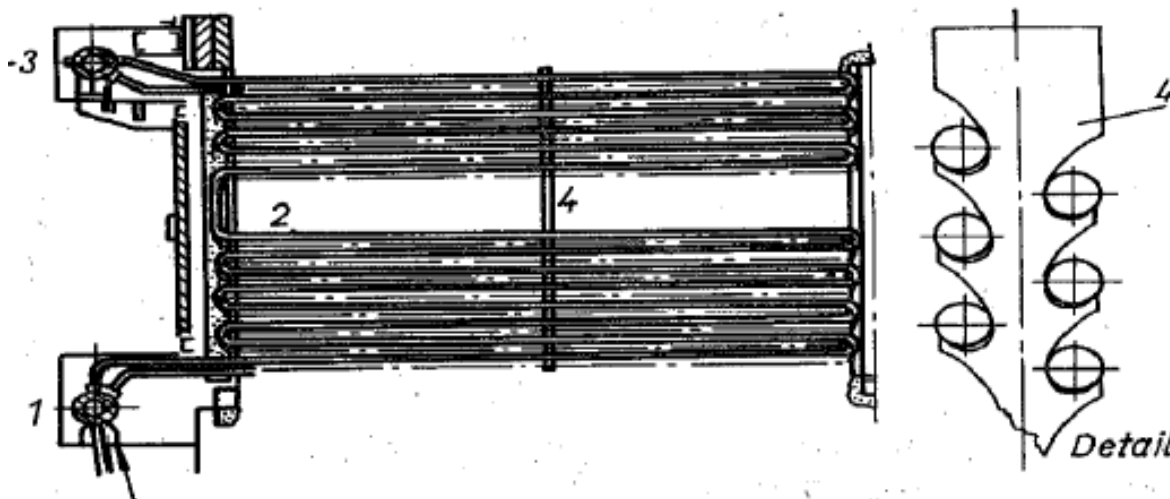
Spalovací zařízení je tvořeno ohništěm neboli spalovací komorou s hořáky nebo roštem (viz obrázek 1). Jeho konstrukce závisí na druhu spalovaného paliva. Při spalování tuhých paliv lze ohniště dělit dle způsobu spalování na roštové, práškové a fluidní. Roštové slouží pro spalování kusových paliv v klidové vrstvě. Fluidní jsou určeny pro spalování tuhých paliv, které jsou pomocí tekutiny uvedeny do vlnosů. A v práškovém ohništi je spalováno palivo v letu ve formě prášku. [3, 4]

Ve vyspělých zemích jsou v posledních letech tuhá paliva nahrazována kapalnými a plynnými, protože mají vysokou výhřevnost, snadno se těží, dopravují a skladují. Vstupní náklady jsou nižší, jelikož není potřeba mlecí okruh, zařízení na odstruskování a místo pro ukládání popela.

Nevýhodou může být vyšší cena paliva, zvýšená tvorba NO_x a vyšší rosný bod spalin, který může způsobovat korozi. Z toho důvodu jsou kotle na tuhá paliva stále velmi rozšířené. [3, 4]

2.2.2 Výměňíková část

Teplo, které je vyprodukováno ve spalovacím zařízení, ohřívá vodu pomocí výměňíkové části. Ta je složena ze tří základních částí: ekonomizéru, výparníku a předhříváku. Příklad možného uspořádání lze vidět na obrázku 1. Ekonomizér je první částí ze strany proudící vody. Slouží k jejímu ohřátí na teplotu blízkou teplotě varu a k ochlazení spalin před vstupem do komína. Skládá se ze svazků trubek, které mají hadovitý tvar, viz obrázek 2. Konstrukce je jednoduchá a při odstavení kotle z provozu lze trubky snadno vyčistit. [3, 4]



Obrázek 2: Ekonomizér [4] (1 – spodní komora, 2 – vlastní trubky, 3 – horní komora, 4 – závěs trubek)

Nejsložitějším zařízením kotle je výparník, kde dochází k přeměně vody na páru. Obvykle je umístěn do míst s největší teplotou spalin a k přenosu tepla dochází sáláním. Jeho hlavní část tvoří varné trubky spojené membránovou stěnou. Tato stěna slouží ke zvýšení přenosu tepla a zabráňuje přehřívání stěn spalovací komory. Další důležitou částí výparníku je buben, který slouží k oddělování vody a páry, odluhování a udržování konstantní hladiny vody ve výparníku. [3]

Posledním zařízením je přehřívák, který slouží k zvýšení účinnosti, přehřátí syté páry z výparníku na požadovanou teplotu a po expanzi v turbíně snižuje vlhkost. Existují dva typy přehříváků, konvenční a sálavé. Konvenční je umístěn v místech nižších teplot spalin a dochází v něm k přenosu tepla konvekcí. Sálavé jsou situovány v ohništi a k přenosu tepla dochází sáláním. Materiály přehříváku jsou často využívány na maximum, a proto se přehřívák rozděluje do několika stupňů vyrobených z odlišných materiálů. Pro zajištění přesných parametrů páry jsou jednotlivé stupně osazeny regulátory. [2–4]

Jednotlivé části kotle jsou velmi často využívány na krajních mezích únosnosti příslušných materiálů, a dochází v nich k mnoha druhům poškození.

2.3 Poškozování kotlů

Poškozování kotlů je nepříznivý jev, který má velký vliv na jejich provoz, vede ke snížení účinnosti nebo až k odstavení kotlů z provozu. To zvyšuje celkové náklady na provoz a údržbu zařízení a snižuje výrobu. Proto je snaha tento proces minimalizovat nebo jej při návrhu kotle

úplně odstranit. Poškození můžeme rozdělit do několika kategorií, například na poškození výrobou, provozem, teplotou, korozí a prouděním.

2.3.1 Poškození výrobou

Již při výrobě zařízení může dojít k jeho poškození. Při samotném návrhu je potřeba zvážit všechna rizika a vytvořit jej tak, aby například někde nedocházelo ke vzniku podtlaku a následné kavitaci. Pro každé zařízení je nutné vybrat vhodný materiál, který je schopen odolat použitým chemikáliím a teplotám. Je potřeba vybrat vhodný polotovár, zkontrolovat svarové spoje a provést odbornou montáž. [5]

2.3.2 Poškození provozem

Do další kategorie lze zařadit poškození provozem, které vzniká při nesprávném používání kotle. Nevhodný náběh kotle může způsobit krátkodobé přehřátí. Při chybném odstavení kotle v něm zůstávají chemikálie a dochází ke korozi. Změna paliva může způsobit například zanášení nebo přehřátí. Další porušení je způsobeno špatnou regulací nebo náhlou změnou zatížení. [5]

2.3.3 Teplotní poškození

Dále se vyskytuje teplotní poškození, které se liší podle doby zatěžování a můžeme jej rozdělit na krátkodobé přehřátí, dlouhodobé přehřátí a creep. Ke krátkodobému přehřátí obvykle dochází v počáteční fázi provozu. Pokud je provoz stabilní a nemění se podmínky spalování ani palivo, nemělo by k tomuto poškození dojít. Zařízení je na krátkou dobu vystaveno vyšší teplotě, než na kterou je konstruováno. To může způsobit vyboulení a při velmi rychlém přehřátí také prasknutí. [2, 5]



Obrázek 3: Dlouhodobé přehřátí [5]

Při nadměrném teplotním zatěžování v řádech dnů, týdnů, měsíců a delším, dochází k dlouhodobému přehřátí, kdy při vysoké teplotě postupně dochází ke ztrátě pevnosti, vyboulení a následnému prasknutí trubek, které je možné vidět na obrázku 3. Speciálním případem přehřátí je creep, při kterém dochází k tečení materiálu vlivem dlouhodobého působení zvýšené teploty a tlaku. [2, 5]

2.3.4 Korozní poškození

Velmi často jsou zařízení poškozena korozí, ke které dochází v místech, kde je povrch zařízení ve styku s tekutinou. Například parní buben, ekonomizér, separátor páry nebo oběžná kola čerpadel (viz 4) jsou často poškozena korozí. K tomuto druhu poškození dochází v oblastech přenosu tepla, a také u zařízení, která narušují plynulý tok tekutiny. Typickým příkladem jsou trubkové svazky, kde může koroze vznikat uvnitř nebo vně trubek. Korozi na vnitřní straně způsobuje špatně upravená voda, nedostatečné vypláchnutí během odstávky a nevhodné chemické čištění. Na vnější straně je koroze způsobena popelem a spalinami. Existuje více druhů tohoto poškození, a to například vysokoteplotní, napěťová, grafitická, únavová, koroze za studena a koroze vzniklá vlivem proudícího media. [2, 5]



Obrázek 4: Koroze oběžného kola čerpadla [5]

2.3.5 Poškození prouděním

Proudění může mít i nežádoucí účinky a vyvolat například poškození erozí, kavitací nebo zanášením. K erozi dochází nejčastěji na straně spalin. Může ji zapříčinit vyfukování spalin, poletavý popílek, klesající struska atd. Narážení částic do trubek způsobuje jejich fyzické odírání a následnou oxidaci, čímž dochází ke ztrátě kovu. Po erozním ztenčení často dochází ke vzniku trhlin. [5]



Obrázek 5: Nános na vnější straně trubek kotle [6]

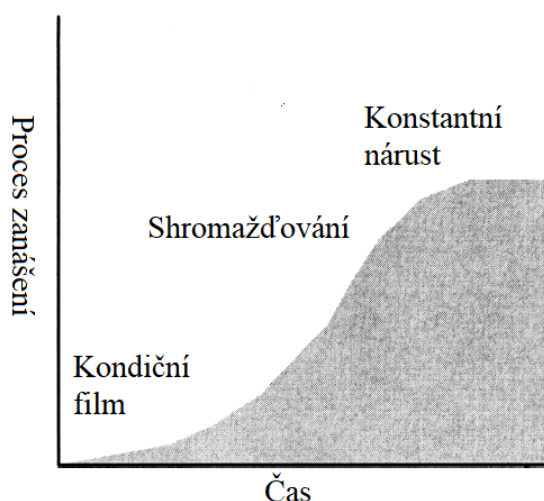
Dalším typem je poškození kavitací, ke kterému dochází v místech, kde je povrch v kontaktu s kapalinou a vzniká tam podtlak. Následně se tvoří bubliny, které se rychle zhroutlí a narušují povrch zařízení. Dochází k výraznému lokálnímu úbytku materiálu a vzniku houbovité struktury, přičemž povrch může být pokryt korozí. [5]

Vlivem proudění může také docházet k zanášení, které za určitých podmínek způsobuje velké problémy. Vyskytuje se na vnitřní i vnější straně trubek (viz obrázek 5). Tento proces začíná, když se povrch trubky dostane do kontaktu s tekutinou. Na povrchu se začne vytvářet tenká vrstva nánosů, která se stále zvětšuje, a tím výrazně snižuje účinnost zařízení. Proces probíhá až do chvíle, kdy zařízení nevykonává svou funkci a je potřeba provoz zastavit, provést čištění, popřípadě výměnu. [7]

3 Proces zanášení

Zanášení je jeden z nejvýznamnějších problémů poškozování kotlů, při kterém dochází k usazování částic na funkčním povrchu, což výrazně ovlivňuje nebo dokonce znemožňuje jeho funkci. Kvůli tomu dochází k navyšování nákladů, a to jak vstupních, tak i provozních a na údržbu. Dochází k problémům s kontrolou kvality a bezpečnosti, a proto je snaha tento proces minimalizovat.

Zanášení obecně začíná v okamžiku, kdy je povrch přiveden do styku s tekutinou. Dochází k němu při turbulentním i laminárním proudění, ale také ve stojatých vodách. Jeho průběh je možné vidět na obrázku 6. Z počátku se účinnost zařízení moc nezmění, vytvoří se pouze kondiční film. U některých typů zařízení se vytvoří během několika minut a u jiných to trvá několik dní. To ovlivňuje mnoho parametrů, a to například geometrie a materiál povrchu pro přenos tepla, rychlosti proudění, vlastnosti tekutin atd. Podoba kondičního filmu je důležitá pro následný průběh zanášení. Po této fázi dochází k prudkému nárůstu nánosu a s tím také k velkým změnám účinnosti přenosu tepla na daném povrchu. V konečné fázi dochází k téměř konstantnímu nárůstu nánosu a tím i k podstatnému snížení přenosu tepla až do chvíle, kdy musí dojít k úplnému vyčištění. [7]



Obrázek 6: Tři fáze procesu zanášení [7]

Zanášení je způsobeno několika mechanismy, které ovlivňují výsledné vlastnosti nánosu.

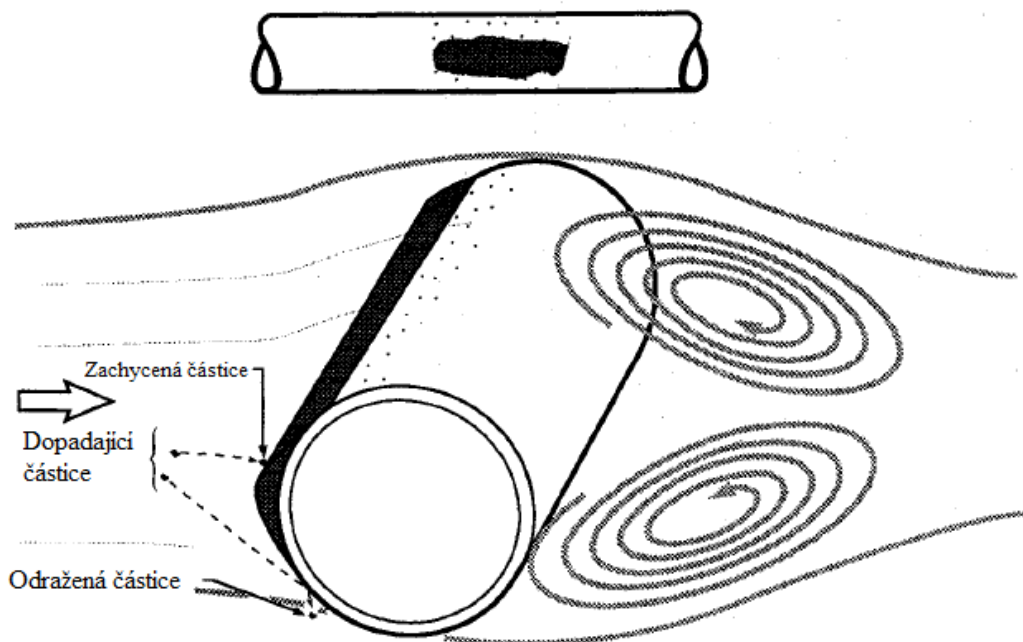
3.1 Mechanismy zanášení

Mechanismus zanášení nejvíce ovlivňuje typ anorganických látek v palivu a podmínky spalování. To má vliv na vlastnosti nánosu, například na jeho houževnatost, tepelnou vodivost, chemické složení, pevnost atd. Mezi čtyři hlavní procesy, které připívají k zanášení, lze zařadit zanášení způsobené vlivem vlastní setrvačnosti částic, termoforéze, kondenzace a chemické reakce. [8]

3.1.1 Vlastní setrvačnost částic

Narážení částic do povrchu trubek je nejčastější způsob usazování. Částice jsou rozptýleny ve vrstvě plynů a postupně naráží na povrch trubek. Účinnost zachycení těchto částic na povrchu závisí na úhlu dopadu a rychlosti, dále pak na složení částic, povrchu dopadu

a viskozitě. Rychlost usazování je závislá na velikosti a hustotě dopadajících částic, vlastnostech plynu a cílové geometrii. [8]

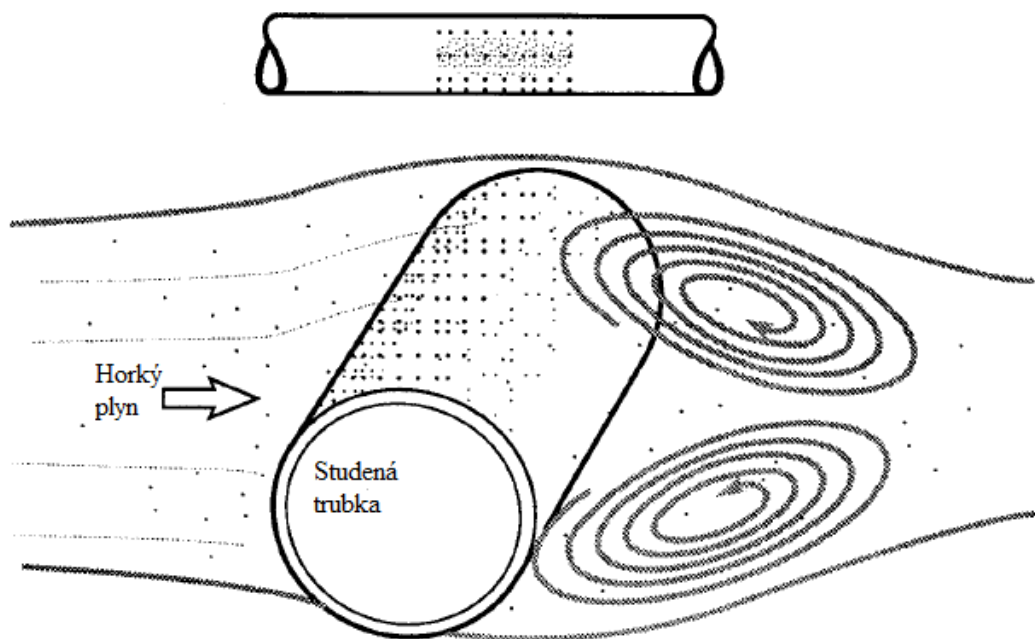


Obrázek 7: Vlastní setrvačnost částic [8]

Na obrázku 7 je znázorněn princip narážení částic na povrch válce. Dvě částice se blíží k válci, překonají tahové aerodynamické síly a dopadnou na válec. Jedna částice od povrchu odskočí a druhá se k němu přilepí. Tok plynu, včetně recirkulace, je znázorněn šedou barvou. Pro tento mechanismus zanášení jsou typické velké částice ($10\mu\text{m}$ a větší) a výsledkem je hrubozrnný nános. [8]

3.1.2 Termoforéze

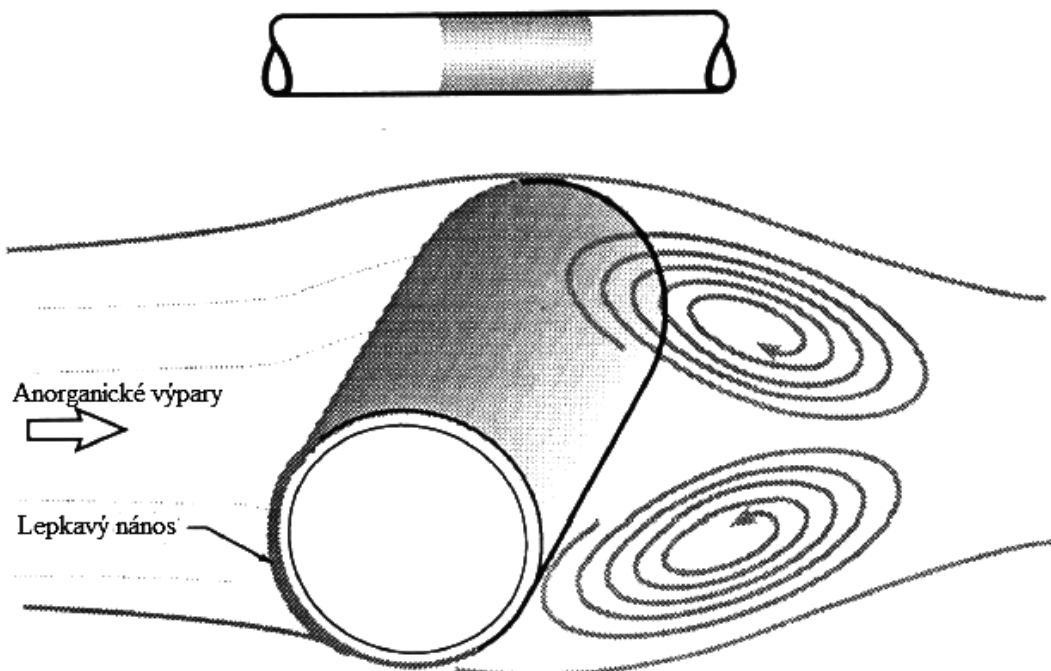
Termoforéze je proces, při kterém jsou částice z proudící tekutiny zachyceny na povrchu procesního zařízení vlivem teplotního gradientu. Týká se pouze submikronových částic, které jsou menší než jeden mikrometr. K tomuto procesu může docházet u proudění kapalin i plynů. Hnací silou je buď teplotní gradient tekutiny, ve které jsou částice rozptýleny, nebo teplotní gradient samotné částice. Teplotní gradienty kapalin obvykle nejsou dostatečně velké, a proto k termoforézi dochází mnohem častěji u plynů. Částice reagují více s molekulami na straně horkého média s vyšší kinetickou energií než na straně studeného média. Srážky vysoce energetických molekul na straně horkého média tvoří silnější síly než na straně studeného média. Tím vzniká síťová síla, která ve většině případů působí ve směru teplotního gradientu. Na obrázku 8 lze vidět, že nános je jemnozrnný a rovnoměrně rozmístěný. [8–10]



Obrázek 8: Termofoforéze [8]

3.1.3 Kondenzace

Kondenzace je proces, při kterém dochází ke změně plynného skupenství na kapalné. Dochází k němu na povrchu, který je chladnější než okolní plyny. Zvětšuje se tak kontaktní plocha mezi jinak zrnitým nánosem a povrchem o několik řádů, jak je vidět na obrázku 9. Obsah anorganických materiálů v uhlí ovlivňuje množství kondenzátu v nánosu. Nejvíce ho produkuje uhlí nižší kvality, hnědé uhlí, biomasa a podobné materiály. Při spalování uhlí vyšší kvality se tento jev téměř nevyskytuje. [8, 11]



Obrázek 9: Kondenzace [8]

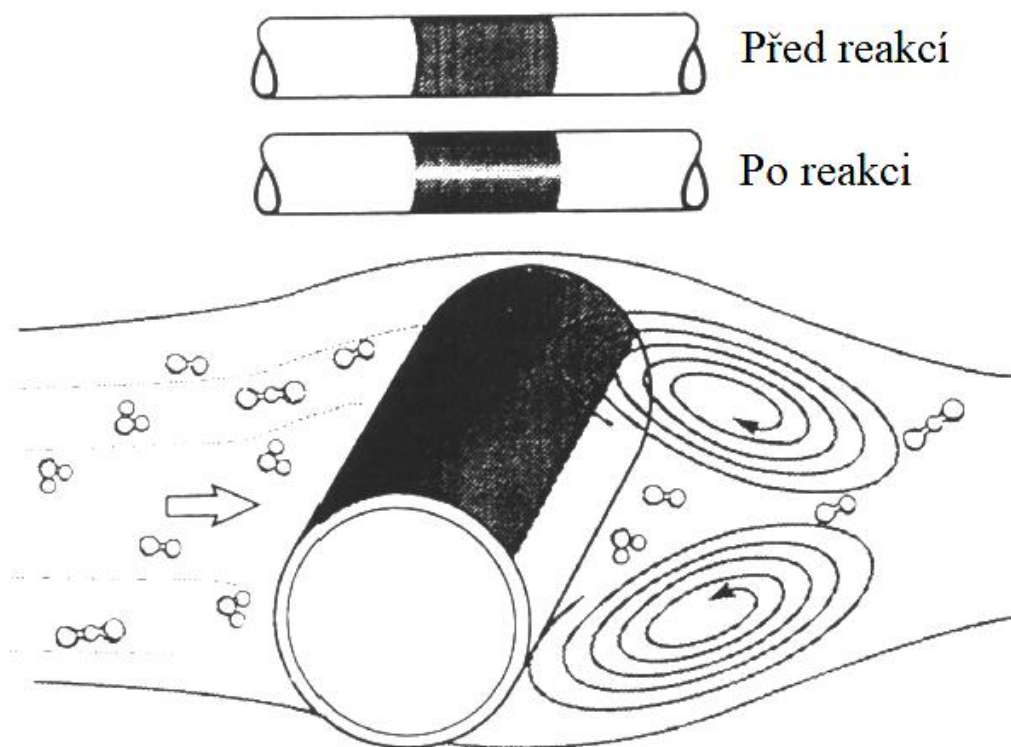
Všechny páry, které vstupují do tepelně ohraničené vrstvy kolem chladného povrchu, a následně s ním přijdou do kontaktu, lze označit jako kondenzát. K tomuto mechanismu dochází třemi způsoby:

- Pára překročí hraniční vrstvu a heterogenně kondenzuje na povrchu nebo v porézním nánosu.
- Vytvoří se homogenní výpary, které se poté termoforézí uloží na povrch.
- Dochází k heterogenní kondenzaci par na jiných částicích v mezní vrstvě a následnému uložení na povrch tělesa pomocí termoforéze.

Granulometrický rozměr kondenzačního nánosu není větší než $0,5\ \mu\text{m}$ a je rovnoměrně rozložen po povrchu. Nános je lepkavý a má velký vliv na účinnost. [8]

3.1.4 Chemická reakce

Díky předchozím mechanismům jsou částice transportovány z dané fáze na povrch trubek nebo jsou na povrch dopraveny pomocí parní fáze. Tyto mechanismy uzavírá chemická reakce zobrazená na obrázku 10, díky které se může hmota v nánosu hromadit. Dochází buď k heterogenní reakci plynu s materiálem uvnitř nánosu, nebo k reakci na samotném povrchu nánosu, což je méně časté. [8]



Obrázek 10: Chemická reakce [8]

Mezi nejdůležitější chemické reakce patří sulface, absorpce alkalických kovů a oxidace. Sulface se týká především sloučenin, které obsahují alkalické kovy. Nejnáchylnější je sodík a draslík ve formě kondenzovaných hydroxidů, případně chloridů. Křemík absorbuje alkalické kovy a vytváří křemičitany, které mají menší tuhost a teplotu tavení. To způsobuje spékání a významné změny v nánosu. Při spalování uhlí se často jeho zbytek ukládá s anorganickými materiály na povrchu spalovací komory. Uhlí pak oxiduje s kyslíkem a vzniká tak usazenina s velmi malým obsahem uhlíku, obvykle menším než 2 %. [8, 10]

4 Simulace charakteru proudění

V této kapitole jsou představeny používané metody pro simulování procesu zanášení trubek v kotli. Následně je vybrána ta nejvhodnější, podle které je provedena simulace tohoto procesu.

4.1 Úvod do modelování procesu zanášení

Zanášení teplosměnných ploch je jedním z nejvýznamnějších problémů, ke kterým dochází při procesu spalování. Vzniklý nános je ovlivněn mnoha faktory jako například tvarem a velikostí částic, teplotou a složením spalin. Velikost proudících částic lze rozdělit na tři třídy: submikronové, střední částice o průměrné velikosti 8 μm a hrubé částice (58 μm). Dále má na ukládání částic vliv turbulence a interakce částic, a síly, které na částice působí. Ty je potřeba zohlednit pro správnou předpověď dynamiky částic. [12]

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, zanášení velmi ovlivňuje mechanismus, pomocí kterého k zanášení dochází. Nejvýznamnější jsou vlastní setrvačné síly částic. V minulosti byly pro odhad tvorby nánosů využívány empirické korelace založené převážně na experimentech. V posledních letech se pro správný návrh spalovacího zařízení a optimalizaci provozních podmínek začalo standardně používat numerické modelování a simulace proudění. [10, 12]

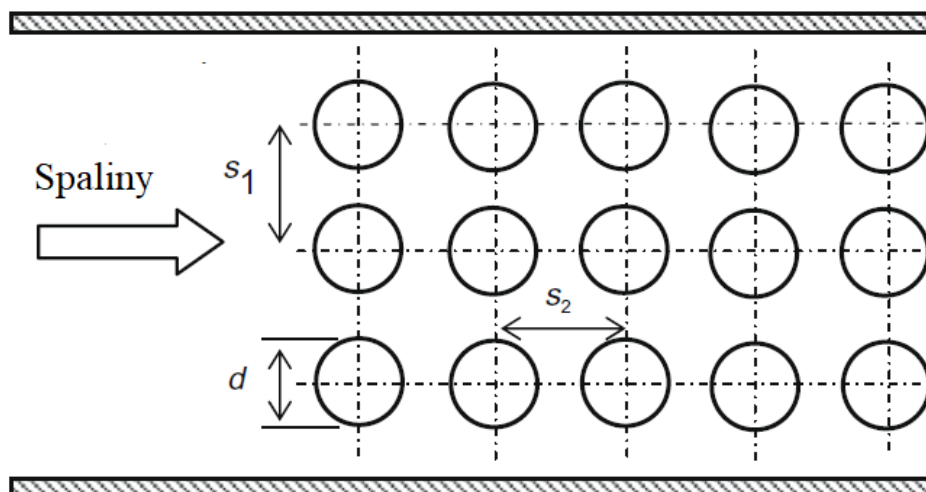
Při ukládání částic dochází ke dvoufázovému proudění, které je obvykle turbulentní a dvě stejné částice vycházející ze stejného místa ve výsledku nemají stejnou trajektorii. Pro získání statisticky nezávislých výsledků je proto potřeba velké množství sledovaných částic, a to vyžaduje dlouhý výpočetní čas. Pro tento typ řešení se využívají například modely „Eddy Lifetime model, Particle Cloud Tracking model a Particle Number Density model“. Také je u dvoufázového toku důležitá teplota, protože ovlivňuje viskozitu toku a částic. [12]

4.2 Dosavadní poznatky analýz různých autorů

Simulování procesu zanášení se v posledních letech věnovalo několik autorů, přičemž nejčastěji se zaměřili na tento proces při spalování uhlí a biomasy. V této diplomové práci byly vybrány a popsány čtyři články různých autorů. Nejprve je uvedena práce J. Tomeczeka a K. Wacłaeiaka, kteří simulovali zanášení při spalování uhlí. Dále následuje simulace od P. Venturiniho, D. Borella, K. Hanjalića a F. Rispoliho, která se věnuje spalování biomasy a od M. G. Péreze, E. Vakkilaina a T. Hyppänea, kteří provedli výpočet procesu ukládání částic při spalování černého louhu. A nakonec je uvedena práce od L. Mu, Q. Qiu, J. Chen, H. Yin, A. Li a X. Chi, kteří prováděli simulaci na kotli sloužícímu k likvidaci odpadních vod.

4.2.1 Modelování zanášení dle J. Tomeczeka a K. Wacłaeiaka

Tato metoda si klade za cíl namodelovat tvorbu nánosů na trubkách přehříváku při spalování uhlí. Nejprve měla být problematika řešena jako 1D tok, což se později ukázalo jako nevhodné a řešení bylo provedeno ve 2D pomocí programu ANSYS Fluent. Na obrázku 11 lze vidět použitý 2D model. Matematické modelování poskytuje informace zejména o velikosti usazenin, z čehož lze dále vypočítat snížení koeficientu přenosu tepla ze spalin do kapaliny. [10]

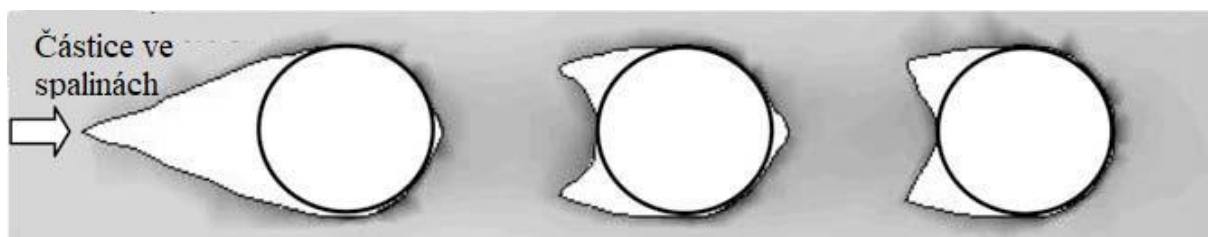


Obrázek 11: Uspořádání trubek v předehříváku [10]

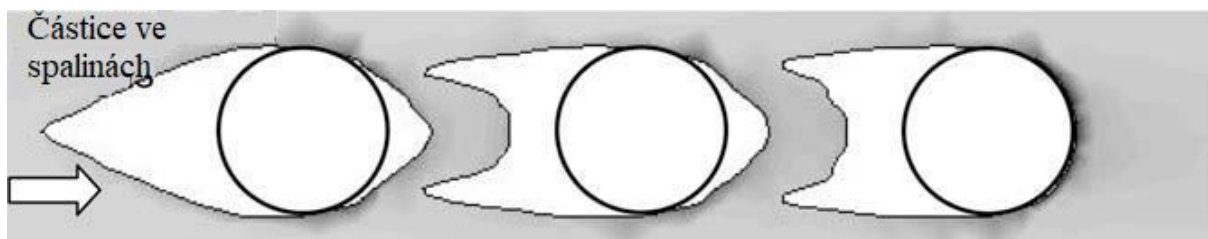
Při výpočtu je potřeba použít řešič, který zahrnuje trajektorii proudícího popela a průtok spalin. Byl zvolen model turbulence $k-\varepsilon$ a pro předpověď turbulentního chování rozptýlených částic popela v kontinuální fázi byl využit „stochastic tracking model“. Pro numerické řešení byly zadány konkrétní geometrické rozměry, složení a teplota spalin, hmotnostní tok popela a tepelní vodivost nánosů. Byla vytvořena tetrahedrální síť, která byla v průběhu výpočtu přizpůsobena zvětšující se vrstvě nánosů. [10]

Na tvorbu usazenin má vliv také recirkulační oblast u trubek ze strany odtoku spalin, kde se mohou ukládat relativně malé částice. Jak již bylo zmíněno, 1D model nebyl schopen správně popsat tok plynu a částic v blízkosti trubek. Proto byl využit 2D model, který umožní správně popsat proudění částic v úzkých prostorách mezi trubkami předehříváku. [10]

Na obrázku 12 a 13 je zobrazen tvar nánosů na třech trubkách v konvekční části předehříváku po devíti měsících provozu. Nános na první trubce ze směru přítoku spalin má zvonový tvar, který je velmi podobný nánosům vznikajícím při využití jedné trubky, zatímco na druhé trubce vzniká usazenina ve tvaru „rohů“. Částice se mohou usazovat také na druhé straně trubek (směr odtoku spalin). K čemuž dochází uvolňováním částic z okolních trubek. U menších částic je tento jev méně efektivní, proto na třetí trubce, nacházející se v konvekční části, není téměř žádný nános. [10]



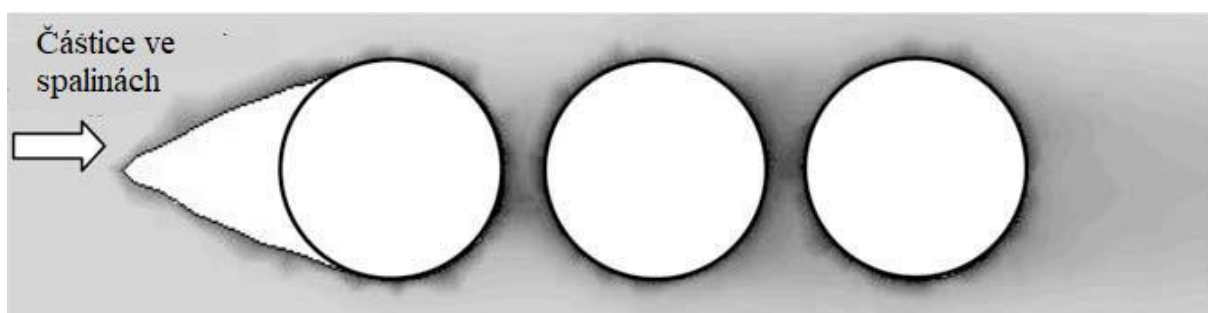
Obrázek 12: Tvar nánosů na trubkách předehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti $33 \mu\text{m}$, $s_1/d = 1,5$, $s_2/d = 2$ [10]



Obrázek 13: Tvar nánosů na trubkách předehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti $55 \mu\text{m}$, $s_1/d = 1,5$, $s_2/d = 2$ [10]

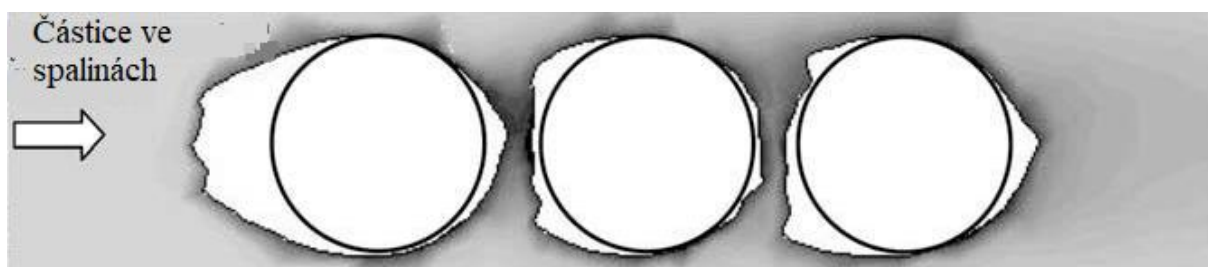
Na obrázku 13 je zobrazena usazenina po 9 měsících provozu těsně před přemostěním. To vede k výraznému zhoršení přenosu tepla a vysokoteplotní korozi, proto je nutné kotel neplánovaně vypnout. Testování různých velikostí částic ukázalo, že při proudění větších částic dochází k tvorbě přemostění rychleji. [10, 13]

V radiální části předehříváku je vzdálenost mezi trubkami větší, a proto dochází k zanášení, převážně ze strany přítoku spalín. Větší částice putují v hlavním rychlostním poli plynu a nejsou schopny proniknout mezi trubky, což je zobrazeno na obrázku 14. [10]



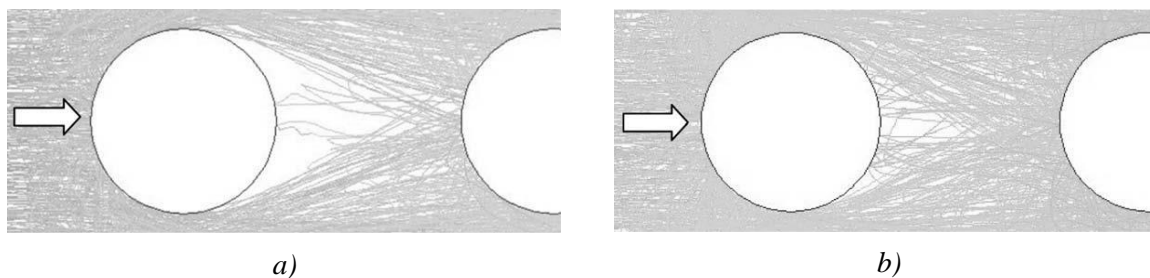
Obrázek 14: Tvar nánosů na trubkách předehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti $33 \mu\text{m}$, $s_1/d = 5$, $s_2/d = 2$ [10]

Naopak na obrázku 15 je zobrazeno proudění menších částic, které pronikají mezi trubky a usazují se na jejich povrchu [10].



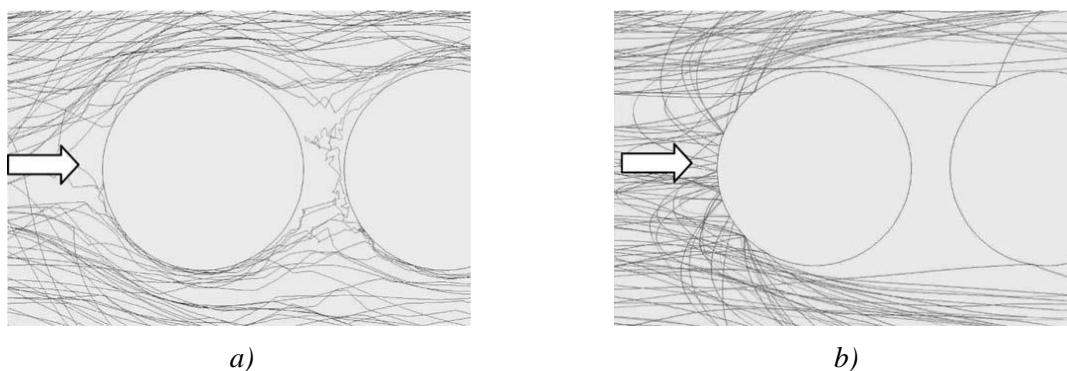
Obrázek 15: Tvar nánosů na trubkách předehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti $1 \mu\text{m}$, $s_1/d = 5$, $s_2/d = 1,2$ [10]

Pro lepší porozumění rozdílu v průběhu zanášení byly vypočteny stopy částic v konvekční a radiální části. Na obrázku 16 je zobrazena konvekční část a na obrázku 17 část radiální. V konvekční části, kterou je možné vidět na obrázku 16 b), mají velké částice po nárazu do povrchu druhé trubky dostatek energie na to, aby se od ní odrazily a dopadly na povrch první trubky ze strany odtoku spalín. Zatímco menší částice, které jsou na obrázku 16 a), mají méně energie a po nárazu do druhé trubky se pouze část z nich odráží a přechází na povrch první trubky. Proto při proudění menších částic dochází k zanášení pomaleji. [10]



Obrázek 16: a) Stopa částice o velikosti $33\ \mu\text{m}$ okolo prvních dvou trubek v konvekční části; b) Stopa částice o velikosti $50\ \mu\text{m}$ okolo prvních dvou trubek v konvekční části [10]

V radiační komoře dokáží do mezitrubkového prostoru proniknout pouze malé částice vlivem recirkulace spalin, což je zobrazeno na obrázku 17 a). Z toho je zřejmé, že průběh zanášení je velmi ovlivněn uspořádáním trubek v kotli a také velikostí částic proudících ve spalinách. [10]



Obrázek 17: a) Stopa částice o velikosti $1\ \mu\text{m}$ okolo prvních dvou trubek v radiační části; b) Stopa částice o velikosti $33\ \mu\text{m}$ okolo prvních dvou trubek v radiační části [10]

Bylo zjištěno, že kvůli tvorbě nánosu klesne koeficient přenosu tepla na první trubce o 12 % po pěti měsících nepřetržitého provozu. Dle teoretických předpokladů dochází při proudění malých částic k zanášení pomocí termoforézních sil. Tento jev v práci nebyl zaznamenán, výsledek však mohl být ovlivněn velikostí mřížky. Dále by dle výsledků této práce nemělo docházet k přemostění v radiační části kotle, avšak dle operátorů kotlů je tento jev běžný. Nedostatky mohou být způsobeny určitými kompromisy, které byly při výpočtu provedeny pro dosažení přijatelného výpočetního času. [10]

Numerická simulace ukázala, že velikost částic má velký vliv na růst nánosu. U velkých částic k zanášení dochází opětovným přemístování částic z jiných trubek, zatímco v radiační části řídí zanášení malé částice vlivem vířivých srážek. [10]

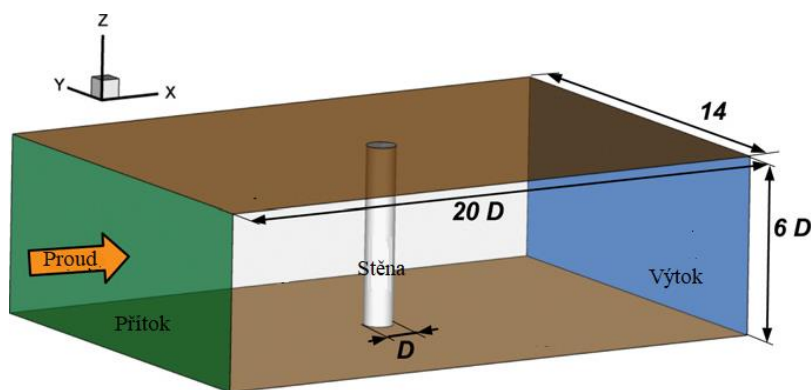
4.2.2 Modelování zanášení dle P. Venturiniho, D. Borella, K. Hanjalića a F. Rispoliho

Tato práce se zaměřuje na zanášení pomocí pevných částic, které jsou větší než $8\ \mu\text{m}$, což vyžaduje určité omezení, ale také přináší určité zjednodušení, protože není potřeba uvažovat submikronové částice, které se velmi rychle přizpůsobují kolísání toku a chovají

se téměř jako tekutina, tedy nemají na zanášení výrazný vliv. Dále se zaměřuje na vliv teploty a různých velikostí částic na růst nánosu. [12]

Při tomto výpočtu byl pro turbulentní disperzi částic použit výpočetní model „Particle Cloud Tracking“ (PTC). Tento model lze využít v průmyslovém řešení, kdy je potřeba získat pouze souhrnný popis vzniklé vrstvy. Pokud je nutné získat detailní popis, musí být provedeno individuální sledování jednotlivých částic „Single Particle Tracking“ (SPT), které vyžaduje velké výpočetní zdroje a dlouhé časy. Avšak v této práci byly pečlivě vybrány prvky, ve kterých částice do domény vstupují a lze z nich získat statisticky nezávislé výsledky za mnohem kratší výpočetní čas než při využití SPT. [12]

Jako výchozí pro validaci správnosti použitého přístupu byly použity výsledky z článku „Dynamic mechanistic model of superheaterdeposit growth and shedding in a biomass fired grate boiler“ od Zhou et al., kde byl numerický výpočet růstu nánosu proveden na laboratorní spalovací komoře na trubce v křížovém toku, která je zobrazena na obrázku 18. V uvedené spalovací komoře byla spalována sláma. Pro zohlednění možných trojrozměrných účinků virů byla provedena 3D simulace a doména byla rozdělena pomocí hexaedrálních buněk. Nános vzniká hlavně na čelním povrchu trubky ze strany přitékajících spalín. Avšak v důsledku nestabilního tlakového pole vznikajícího periodickým vypouštěním virů, dochází k zanášení po celé tokové oblasti včetně oblasti ze strany odtoku spalín. Proto je využita nestacionární simulace. Je vybrán model ζ -f, který dobře zachycuje proudění a turbulenci v okolí trubky. [12]



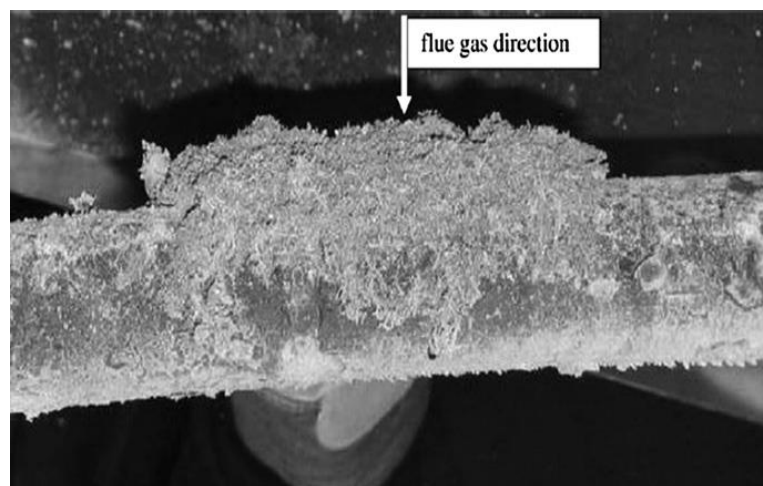
Obrázek 18: Výpočetní doména s okrajovými podmínkami [12]

Dále byly provedeny tři typy simulací, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce 1. V simulaci A a C byly použity odlišné velikosti částic a v B shodné. [12]

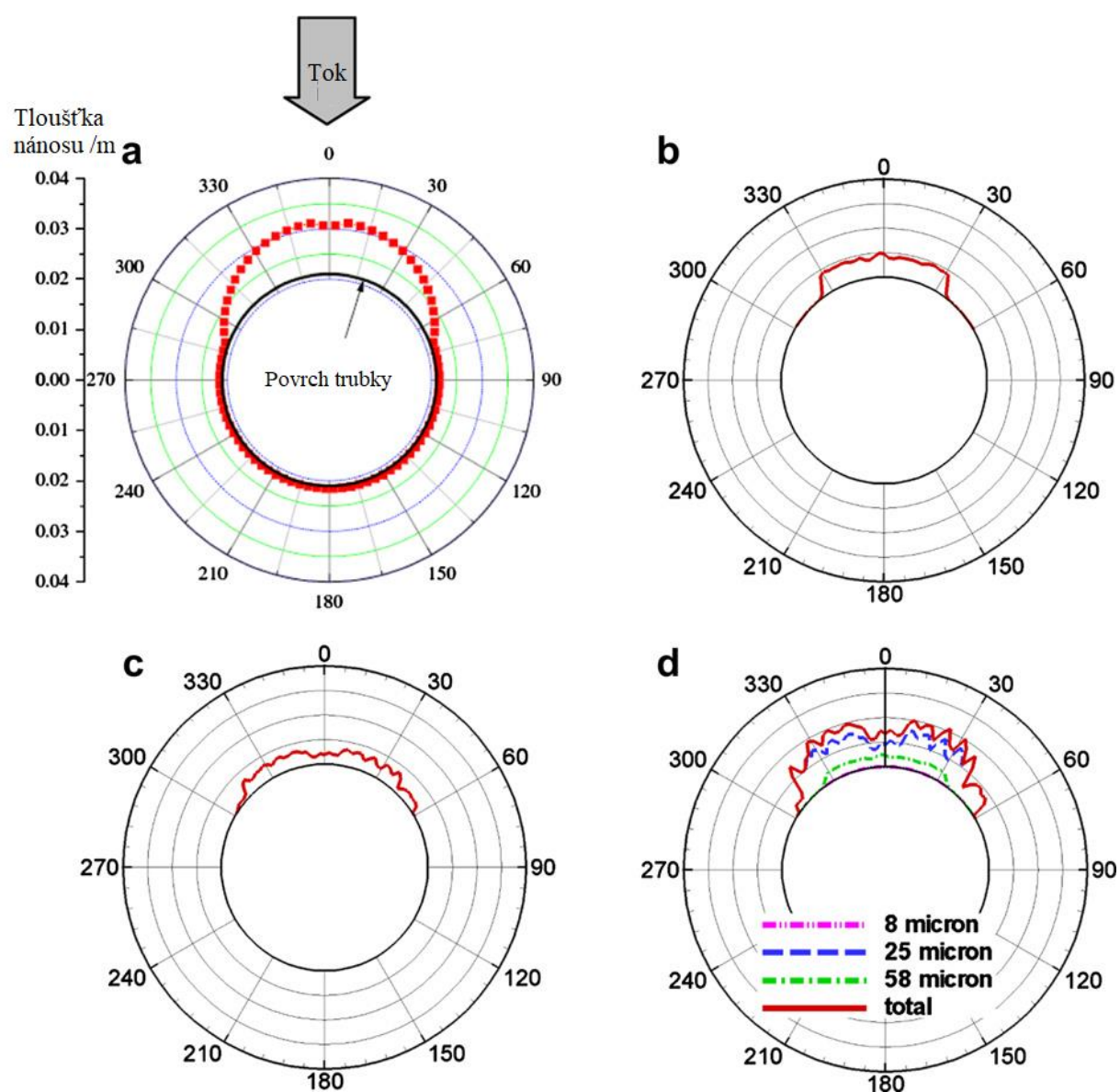
Case	8 μm	25 μm	58 μm
A	4.9E-7 [kg/Nm ³]	–	9.3E-4 [kg/Nm ³]
	8.36E-12 [m ³ /m ³]	–	1.59E-08 [m ³ /m ³]
B	–	2.0E-4 [kg/Nm ³]	–
	–	3.41E-09 [m ³ /m ³]	–
C	4.9E-7 [kg/Nm ³]	4.65E-4 [kg/Nm ³]	4.65E-4 [kg/Nm ³]
	8.36E-12 [m ³ /m ³]	7.93E-09 [m ³ /m ³]	7.93E-09 [m ³ /m ³]

Tabulka 1: Koncentrace částic a objemový zlomek používané pro jednotlivé simulace

Na obrázku 19 je fotografie skutečného nánosu vzniklého v laboratorních podmínkách po 3,5 h. Je patrné, že vzniklý nános je poměrně symetrický, ale velmi nepravidelný a v oblasti stagnační linie je vrstva nesourodá. V porovnání s obrázkem 20.a, kde je předpokládán poměrně hladký a pravidelný nános, ale byla dobře předpovězena stagnační oblast, kde je tloušťka nánosu menší. [12]

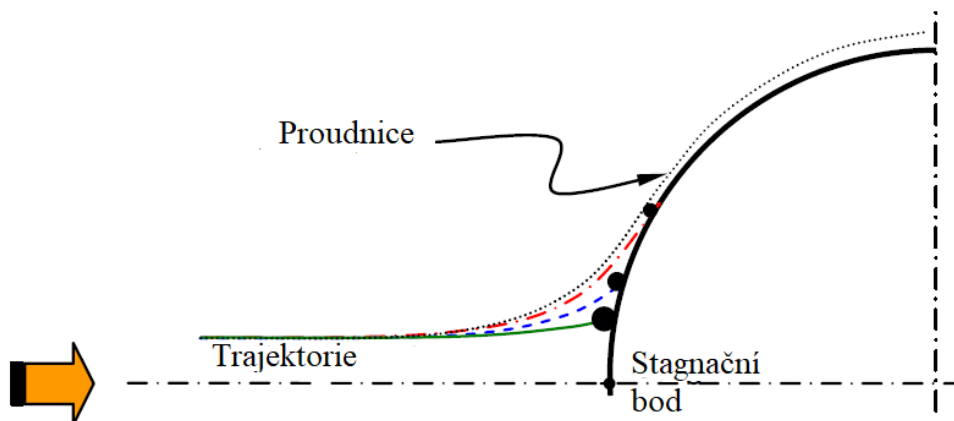


Obrázek 19: Fotografie skutečného nánosu po 3,5 h [12]



Obrázek 20: Numerická předpověď tloušťky vzniklého nánosu po 3,5 h; a) Zhou et. Al.; b) simulace A; c) simulace B; d) simulace C [12]

Výsledky vycházející ze simulace A, zobrazené na obrázku 20.b, se poměrně liší od referenčního výsledku 20.a. Vzniklá vrstva je poměrně pravidelná s malými vrcholy kolem stagnační oblasti. Malé částice ($8\text{ }\mu\text{m}$) nemají na zanášení téměř žádný vliv, jejich koncentrace je velmi malá a proudí jako tekutina. Hlavní podíl na zanášení mají velké částice. Pro simulaci B (obrázek 20.c) byly použity částice o velikosti $20\text{ }\mu\text{m}$ a v její stagnační oblasti je zaznamenán tenčí nános, než v případě referenčního výpočtu 20.a. Tento rozdíl se snižuje s rostoucí velikostí částic. Menší částice mají malou setrvačnost a při náhlém zakřivení následují proud tekutiny. Větší částice mají naopak větší setrvačnost a při zakřivení se odchýlí od proudící tekutiny a dopadnou na povrch trubky v blízkosti stagnačního bodu, což je zobrazeno na obrázku 21. [12]



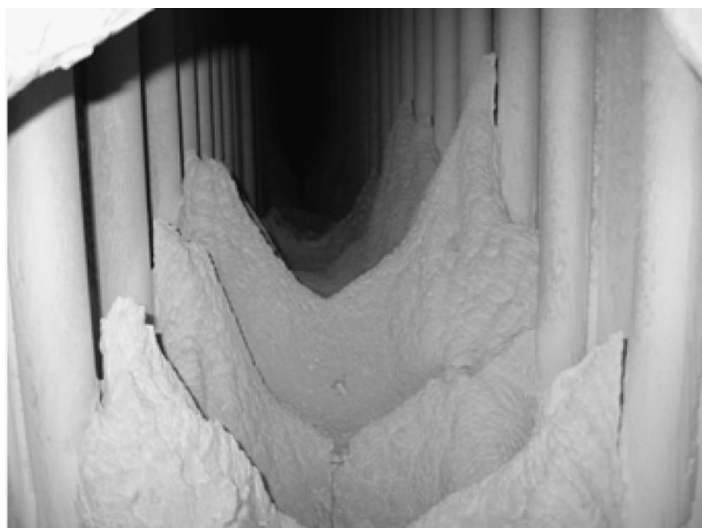
Obrázek 21: Setrvačný pohyb částic různé velikosti vycházejících z jednoho bodu [12]

Poslední simulace C, uvedená na obrázku 20.d, je referenčnímu výsledku nejbližší. Odlišný tvar a tloušťka může být způsobena mnoha faktory. Například tím, že referenční výpočet probíhal v malé laboratorní spalovací komoře. [12]

4.2.3 Modelování zanášení dle M. G. Péreze, E. Vakkilainena a T. Hyppänen

Tato metoda se zabývá ukládáním pevných částic ze spalin na teplosměnné plochy, které se využívají pro výrobu celulózy a v papírenském průmyslu. Zanášení je jedním z nejobávanějších jevů u tohoto typu kotlů (ukázku lze vidět na obrázku 22), jeho modelování je totiž velmi obtížné. Jako palivo je používán černý louh, což není úplně běžné, jelikož je velmi suchý a provoz těchto kotlů je náročný. [14]

Model, který je v práci prezentován, se skládá ze čtyř trubek a pro zobrazení různých efektů toků využívá parametrické modelování skládající se z 8 různých vzdáleností mezi trubkami. Pro simulaci částic popela v toku je použit diskretní fázový model. Je počítán rostoucí nános na trubkách a dynamický model tomu přizpůsobuje síť. Částice jsou sledovány Lagrangeova přístupem. Nejprve je řešena kontinuální fáze plynu samostatně a poté jsou do toku vstřikovány rovnoměrně rozmístěné částice. V okrajových podmínkách je nastaven časový krok tak, aby počet vstřikovaných částic odpovídal jejich koncentraci ve spalinách. Ukázalo se, že tento model funguje spolehlivě, pokud je objemová koncentrace částic menší než 10 %. [14]

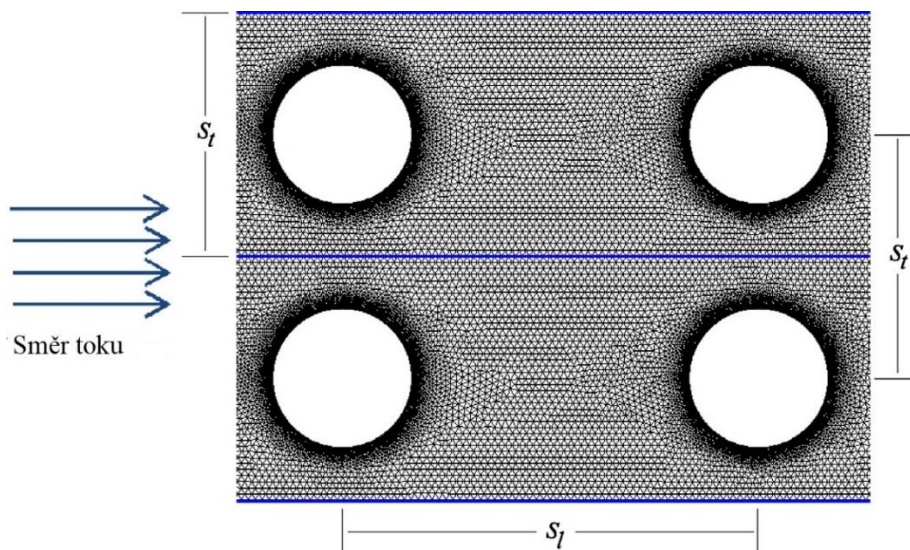


Obrázek 22: Fotografie vzniklého nánosu blížícího se k úplnému ucpání prostoru mezi trubkami [14]

Při analyzování spalín, je zřejmé, že pohyb velmi malých částic je ovlivněn průtokem. Proto se neočekává, že by na zanášení měly velký vliv jejich vlastní setrvačné síly, ale v modelu je uvažována termoforéze a Brownův pohyb. [14]

Periodicky nestálého toku mezi trubkami je dosaženo kombinací Karmánovy vírové stezky a Coandova efektu. Různé uspořádání trubek, tvoří různé proudění. Některé mají trojrozměrný charakter, avšak kvůli výpočtovým omezením byl výpočet proveden ve 2D. [14]

Síť byla použita tetrahedrální a na každé trubce musela existovat malá počáteční vrstva nánosu o tloušťce 0,1 mm. V průtokové oblasti byla nastavena funkce zvětšující se velikost buněk se zvětšující se vzdáleností od povrchu trubky. Počáteční velikost buňky byla zvolena 0,25 mm a rostoucí faktor 1,2. Výsledná síť je zobrazena na obrázku 23. Dále byly nastaveny potřebné vstupní hodnoty a byl vybrán model turbulence $k-\omega$, protože proudění je převážně turbulentní a rychlost toku v okolí trubek je vysoká. [14]



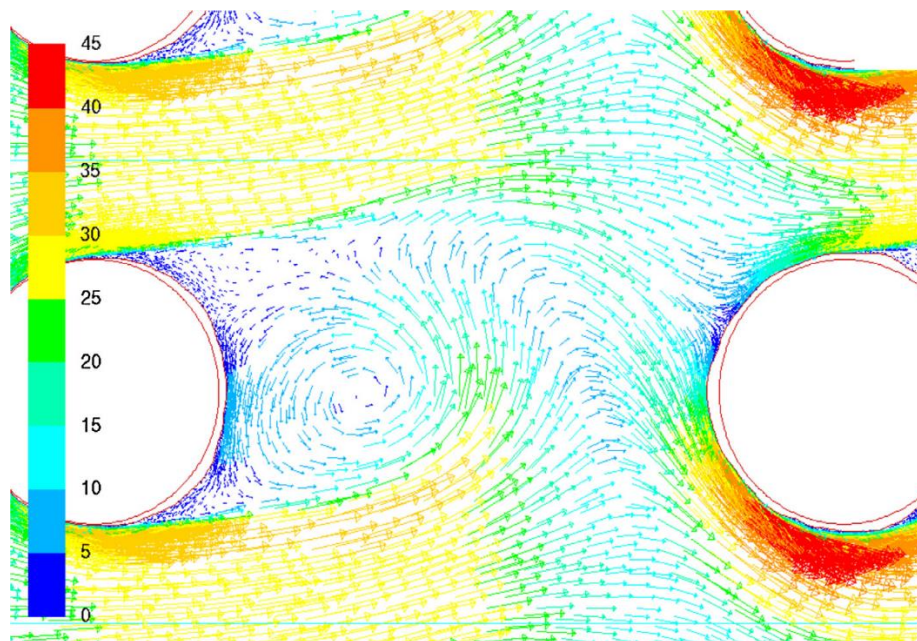
Obrázek 23: Síť pro $s_t = 1,75 d$, kde průměr trubky $d = 50 \text{ mm}$ [14]

Vyskytl se problém při použití dynamické sítě, která není schopna absorbovat příliš velké posuny a vznikají v ní negativní objemy. Buňky proudícího media vstupují do oblasti nánosu

a naopak. Takže některé buňky jsou stále v kontaktu s mezifází a některé se musí obrátit. po vyskytnutí této chyby je simulace ukončena. [14]

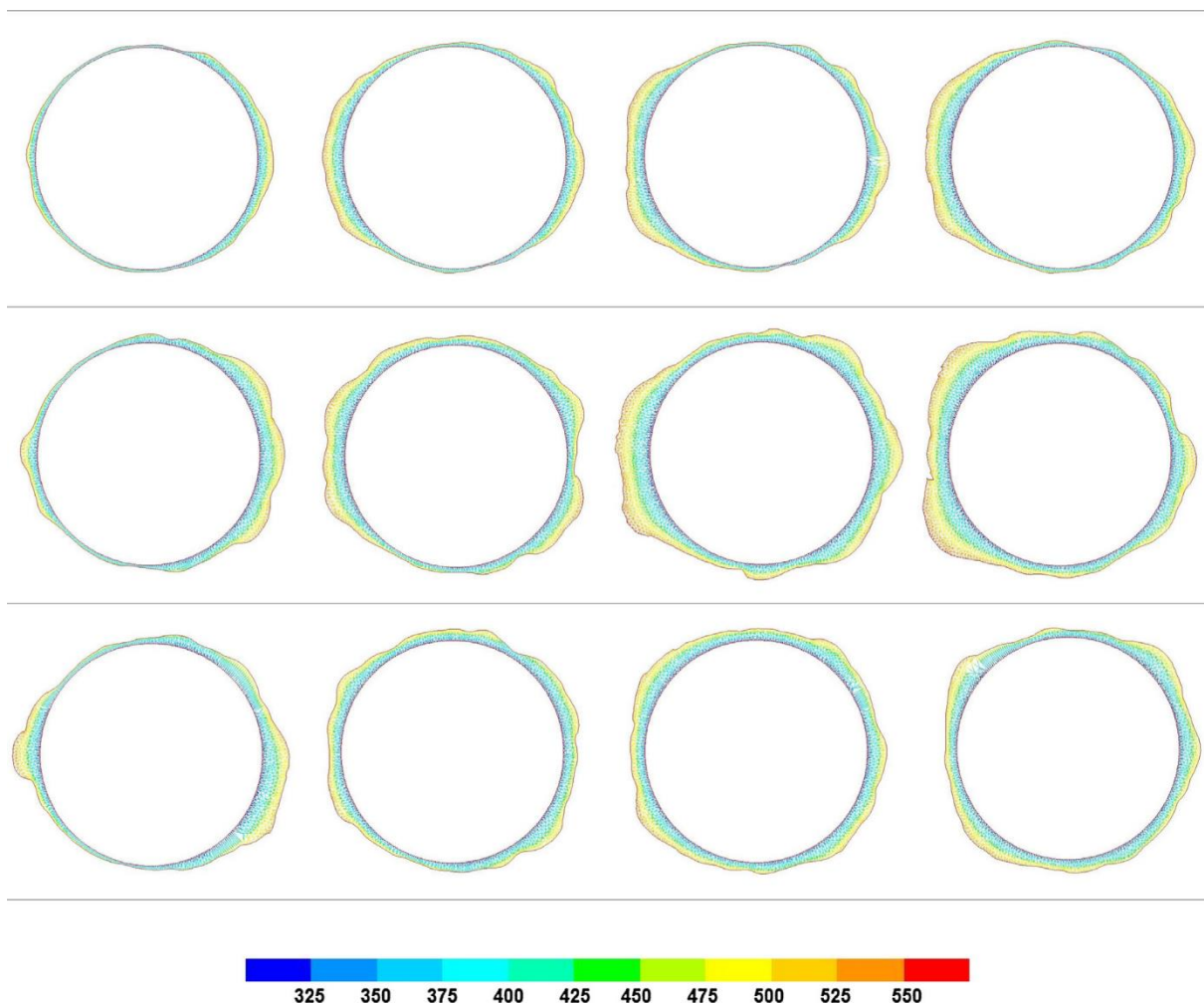
Dále dochází ke vzniku trhlin, které vznikají v případě, že na sousedních plochách dochází k tvorbě velmi odlišné vrstvy nánosu. Tudíž plochy, které by se měly pohybovat ve stejném směru, začnou růst proti sobě. I přes to, že je model schopen dále pokračovat v simulaci, výpočet v oblasti trhlin už není přesný a nastávají problémy s konvergencí. [14]

Kvůli silnému Coanda efektu proudy s vysokou rychlostí opouští úzký prostor mezi trubkami a odchyľují se k opačné straně následující trubky. Tento jev způsobuje silný a nepravidelný nános a jeho vektorové zobrazení je ilustrováno na obrázku 24. [14]



Obrázek 24: Tok mezi první a druhou trubkou ovlivněný Coanda efektem [14]

Aby se předešlo zmíněným problémům je možné využít další filtrace a vyhlazení povrchu nánosu, což může být předmětem dalšího výzkumu. V této práci byly provedeny simulace pro různé vzdálenosti trubek s_t , dokud se neobjevila první buňka s negativním objemem, která znemožnila pokračování simulace. Výpočet obvykle skončil po 20 cyklech s tím, že délka každého cyklu je odlišná vzhledem k odlišné vzdálenosti trubek. Výsledný tvar nánosu na jednotlivých trubkách je zobrazen na obrázku 25. [14]



Obrázek 25: Výsledný tvar nánosu, shora dolů $s/D=1,5$; $2,25$ a $3,0$, proud spalín šel zleva doprava, čas zanášení je shora dolů je $1:54$; $3:10$ a $5:20$ (h:min) a nános je zbarven teplotou ve $^{\circ}\text{C}$ [14]

Bylo zjištěno, že průběh zanášení je v čase odlišný. Nános vznikající na čisté trubce neodpovídá nánosu vznikajícímu nakonec na zanesené trubce. To znamená, že vzniklý nános ovlivňuje tok a mechanismus zanášení. Dále dochází k tvorbě nepravidelného profilu povrchu na zanesené trubce oproti čisté, což je způsobeno vznikem vrcholů. Nejprve dochází k tvorbě hladkého nerovnoměrného nánosu. V oblastech vyvýšenějšího nánosu dochází k stagnaci toku a tyto oblasti jsou schopny zachytit více částic. Dochází tak ke zvětšování určitých oblastí a po dostatečně dlouhém čase z nich vzniknou vrcholy. [14]

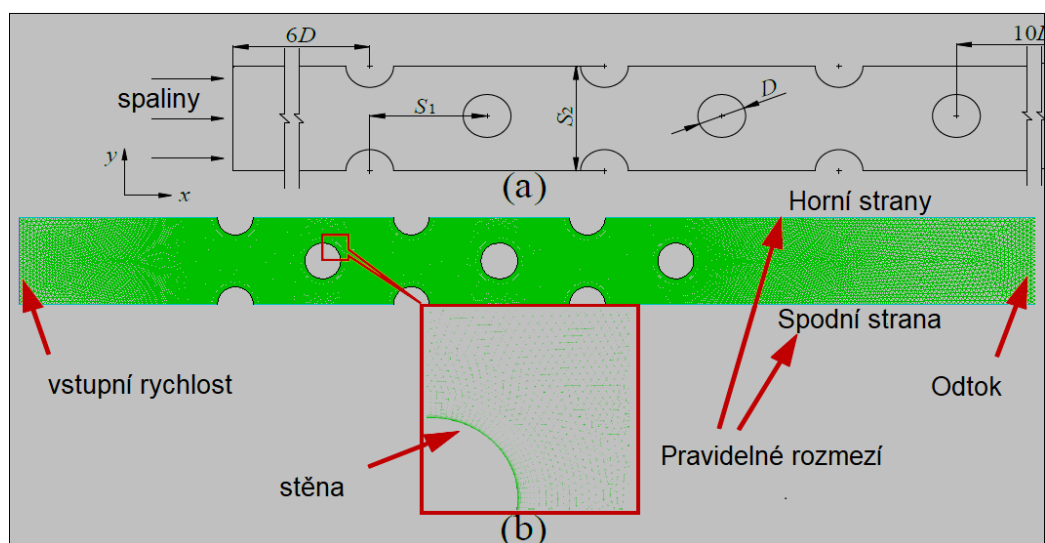
Obecně lze pozorovat, že míra nánosu klesá s rostoucí vzdáleností s_t . Zajímavé je, že na povrchu první trubky je zachyceno nejméně částic. Většina z nich je tažena pravidelným proudem a první trubce se vyhne. Dále jsou částice urychlovány a vzniká vířivé proudění, které způsobí velký nános na přední straně druhé trubky. Rovněž je možné si všimnout, že každá následující trubka má větší nános ze strany odtoku spalín než ta předcházející. [14]

4.2.4 Modelování zanášení dle L. Mu, Q. Qiu, J. Chen, H. Yin, A. Li a X. Chi

V této práci je proveden numerický výpočet sloužící pro předpověď distribuce částic ze spalín a následného zanášení trubek v kotli na odpadní teplo, který je využíván k průmyslové rafinaci a u chemických odpadních vod. Spalování je používáno pro likvidaci průmyslových odpadních vod, které jsou vysoce toxické a obtížně biologicky rozložitelné. Vzniklé odpadní teplo může být využito pro generování páry v parním generátoru. Během tohoto procesu vzniká velké

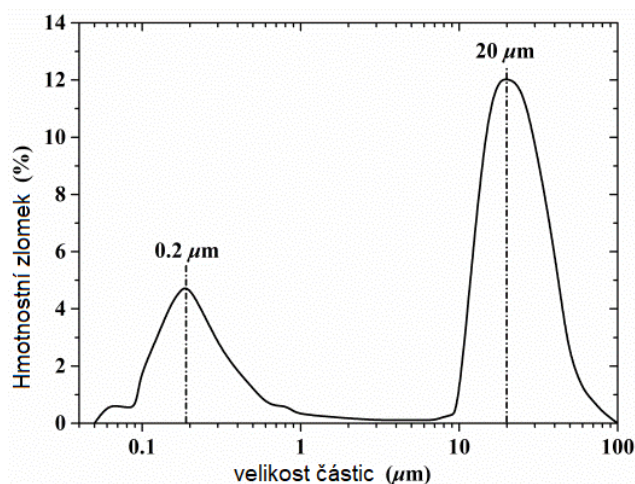
množství nespalitelných anorganických částic, které se transformují a uvolňují jako částice popela. Tyto částice jsou vedeny spolu se spaliny a mají tendenci se usazovat, což vede k vážným problémům, a nakonec může dojít k neplánovanému odstavení kotle. [13]

Byl použit 2D model s šestiřadým stupňovitým uspořádáním trubek, který je zobrazen na obrázku 26. Byla na něm zkoumána výsledná trajektorie částic a jejich vliv na daný proces po dopadu na teplosměnný povrch. K řešení turbulentního proudění, různých velikostí částic, rychlostí toků a různých vzdáleností trubek byl použit dvoufázový model Eulerian-Lagrangian, kde je kontinuální fáze řešena Navier-Stokesovou rovnicí a v disperzní fázi je sledováno velké množství částic procházejících skrz proudící pole. Mezi fázemi dochází k výměně energie a hmoty. Spaliny jsou ve výpočtu považovány za stlačitelné a pro jejich turbulentní tok byl vybrán model $k-\epsilon$. [13]



Obrázek 26: Schématické uspořádání trubek v kotli; (a) zjednodušený model trubek; (b) model používaný pro simulaci s výpočetní mřížkou a okrajovými podmínkami [13]

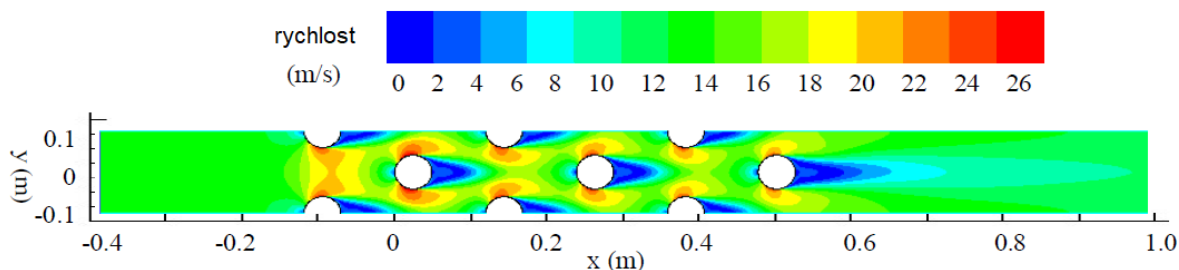
Pro sledování částic popela, které jsou považovány za sférické, nereagující a nerotující, je vybrán Lagrangeův přístup. Ten je popsán obyčejnými diferenciálními rovnicemi a je v něm přihlédnuto k možným působícím silám, jako například tahové, termoforézní a Brownově síle. Pro zjednodušení byly vybrány dvě velikosti částic popela, které v toku převažují, a to $0,2 \mu\text{m}$ a $20 \mu\text{m}$. Celkové rozdělení velikostí částic je na obrázku 27. [13]



Obrázek 27: Rozdělení velikostí částic popela má bimodální charakteristiku [13]

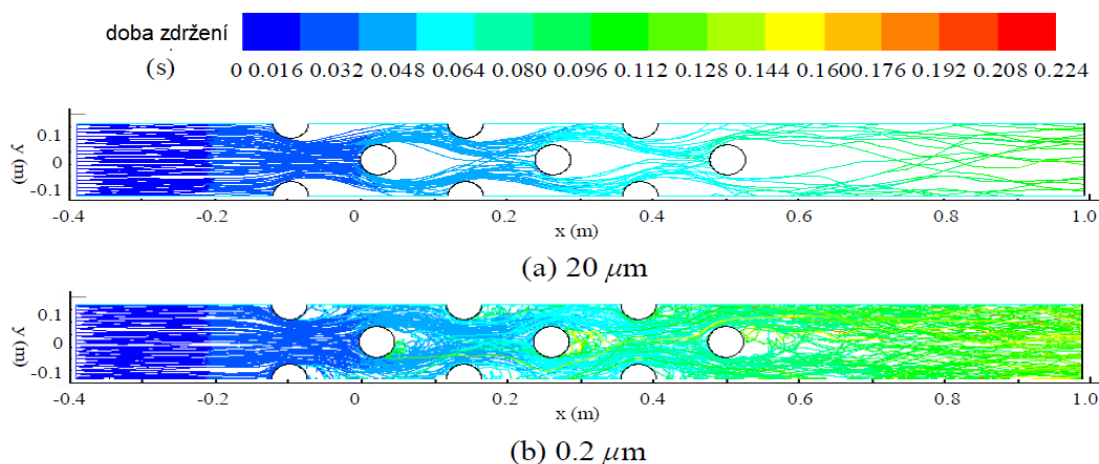
Pro vytvoření sítě byla použita kombinace nestrukturované mřížky a jemné sítě v oblasti hraniční vrstvy. Správně zvolená mřížka může velmi ovlivnit náročnost výpočtu, proto bylo provedeno testování tří typů mřížek s různým počtem buněk, a nakonec byla použita mřížka s 53 624 buňkami, která dávala srovnatelné výsledky s mřížkou s 85 613 buňkami. [13]

Dále byly řešeny jednotlivé proudové charakteristiky a jejich vliv na zanášení. Bylo zjištěno, že převážně rychlost toku spalin, která je zobrazena na obrázku 28 ovlivňuje narážení částic popela na plochy přenosu tepla. V určitých místech dochází k nárůstu rychlosti vlivem snížení cirkulačního prostoru mezi trubkovým svazkem a v závětrné části trubek dochází k vzniku virů. [13]



Obrázek 28: Rychlost kontinuální fáze [13]

Na obrázku 29 jsou zobrazeny trajektorie částic o velikosti 20 μm a 0,2 μm . Je zřejmé, že větší částice mají větší kinetickou energii a jsou schopny se pohybovat podél své trajektorie a narážet na povrch trubek ze strany přítoku spalin. Zatímco menší částice mají menší kinetickou energii a jejich pohyb je ovlivněn plynnou fází, některé jsou strženy vniklými víry a dopadají na trubky ze strany odtoku spalin. Tyto částice tedy ovlivňují celý teplosměnný povrch trubky a mají delší zadržný čas ve výpočtové doméně než větší částice. [13]



Obrázek 29: Trajektorie částic popílku o velikosti (a) 20 μm a (b) 0,2 μm [13]

Následně byly provedeny různé druhy simulací, aby bylo detailněji zjištěno, jaký vliv má na zanášení různá velikost a rychlost částic a různé rozteče trubek. Z výsledků pro odlišné velikosti částic je zřejmé, že větší částice dopadají převážně na povrch prvních dvou trubek ve směru přítoku spalin. To je způsobeno tím, že hlavním mechanismem způsobující zanášení velkými částicemi je mechanismus vlastních setrvačných sil. Kdežto menší částice jsou ovlivněny především termoforézními silami a Brownovým pohybem a jsou tedy nerovnoměrně distribuovány po celém povrchu všech teplosměnných trubek. [13]

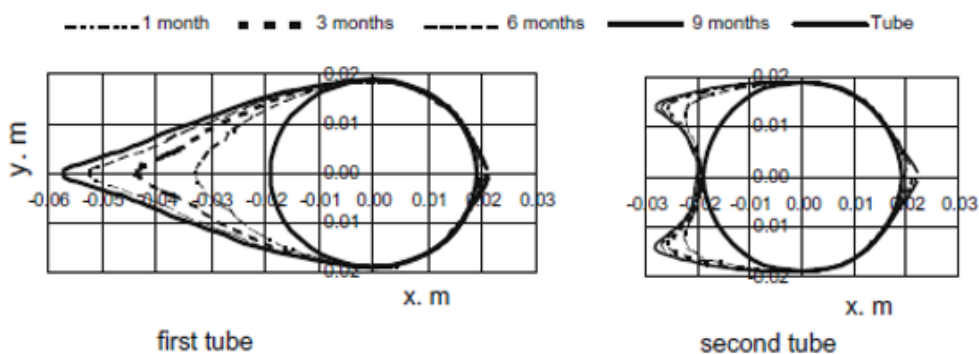
Dále byla provedena simulace, kde byly použity částice s pěti různými vstupními rychlostmi a dvěma velikostmi. U větších částic, jak již bylo zmíněno výše, je dominantní mechanismus vlastních setrvačných sil. Čím mají částice větší rychlost, tím mají větší kinetickou energii a efektivněji dopadají na teplosměnný povrch. Účinnost dopadu menších částic nepatrně stoupá se zvyšující se rychlostí a má tendenci tvořit rovnoměrně rozložený nános na všech teplosměnných plochách. Tento jev je způsoben tím, že s rostoucí vstupní rychlostí roste také kinetická energie částic a ty mají tím pádem dostatek síly, aby se pohybovaly mezi plynnými spaliny. [13]

Při výpočtech s různými roztečemi trubek bylo zjištěno, že různá podélná rozteč trubek nemá významný vliv na účinnost usazování a při použití různé příčné rozteče dochází s jejím růstem k postupnému poklesu efektivity dopadu částic. [13]

4.3 Simulace proudění pro určení teplotního zatížení a součinitelů přestupu tepla

Diplomová práce je inspirována první uvedenou metodou, a to konkrétně modelováním zanášení dle J. Tomeczeka a K. Waclaeiaka [10]. Byla provedena simulace proudění spalín okolo trubek předehříváku kotle. Proudící spaliny vznikají spalováním černého uhlí, které je jedním z nejpoužívanějších druhů paliv v dnešní průmyslové praxi.

Nejprve byly dopočítány chybějící vstupní hodnoty proudících spalín, dále byly vytvořeny dva druhy modelů ve 2D, jeden s čistými trubkami a druhý se zanesenými trubkami. Pro vytvoření modelu se zanesenými trubkami byl vybrán konkrétní model s nánosem z práce J. Tomeczeka a K. Waclaeiaka (viz kapitola 4.2.1), který byl vytvořen na trubkách předehříváku po 9 měsících nepřetržitého provozu kotle a je zobrazen na obrázku 30 [10]. Nakonec byla provedena simulace proudění spalín pro zjištění teplotního zatížení trubek a součinitelů přestupu tepla.



Obrázek 30: Tvar nánosu na prvních dvou trubkách předehříváku [10]

4.3.1 Popis použitých programů

Jelikož je vývoj prototypů a provádění experimentů velmi časově, ale i finančně náročný a při troubleshootingu je často nemožné dostat se ke všem datům a informacím o zařízení, jsou v posledních letech velmi rozšířené počítačové simulační programy. Jako například CHEMCAD, ANSYS Fluent apod., z nichž některé byly využity také v této diplomové práci. Jsou využívány v mnoha průmyslových odvětvích, v leteckém, chemickém, petrochemickém, automobilovém, stavebním, strojírenském průmyslu atd., kde jsou aplikovány například na řešení průběhu proudění, pevnostní a dynamické výpočty, simulace spalování, chlazení, návrhy a optimalizace široké škále procesních a strojních zařízení apod.

CHEMCAD

Jako první byl použit CHEMCAD 7, což je americký program od společnosti Chemstations, Inc., sloužící k simulaci chemických, petrochemických, farmaceutických, mechanických a enviromentálních procesů. Obsahuje knihovnu termodynamických modelů, rozsáhlou databázi chemických látek a směsí a knihovnu běžných provozních jednotek. Jeho součástí jsou sady modulů pro specifické použití, například modul pro kontrolu a optimalizaci statických nebo dynamických procesů, pro návrh a výpočet výměníků tepla, pro návrh a výpočet armatur a potrubních sítí atd. Mezi jeho výhody patří vysoká přizpůsobitelnost, cenová dostupnost, přehledná grafika a snadný export dat do jiných programů. V této práci byly pomocí zjednodušeného procesního schématu dopočteny základní parametry spalin. [15]

ANSYS Fluent

Dále byl využit ANSYS Fluent 18.1, patřící americké společnosti ANSYS Inc., který slouží k provádění počítačových simulací proudění ve 2D nebo 3D a využívá metodu konečných objemů. Všechny výpočty jsou řešeny na základě tří zákonů, a to konkrétně zákon zachování hybnosti, hmoty a energie. Modelování touto metodou je využíváno v široké průmyslové škále, například v biomedicině, farmacii, chemickém, petrochemickém, hydraulickém a automobilovém průmyslu. Mezi hlavní výhody patří detailnost informací, rychlost vývoje a optimalizací a obvykle také nižší náklady a menší časová náročnost v porovnání s experimentem. Program byl v této práci použit pro řešení proudění spalin v okolí trubek a následnému zjištění teplotního zatížení těchto trubek a jejich koeficientů přestupů tepla. [16]

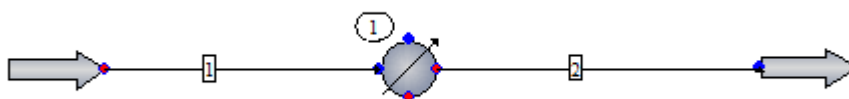
ANSYS Mechanical

Jako další byl opět použit program americké společnosti ANSYS Inc., který umožňuje kompletní řešení statických i dynamických pevnostních a teplotních výpočtů na základě metody konečných prvků. Program je hojně využíván v mnoha inženýrských oblastech, převážně pro řešení pevnostních a dynamických úloh, ale lze také využít na řešení vedení tepla, záření a proudění. [17]

ANSYS Mechanical, lze použít buď v klasické prostředí Mechanical APDL, anebo v moderním grafické prostředí Workbench. Výpočet pro tuto diplomovou práci byl proveden v prostředí Workbench, mezi jehož hlavní výhody patří snadná ovladatelnost, přehlednost o aktuálním stavu, díky stromové struktuře, rozšiřitelnost funkcí pomocí připojení skriptů APDL, propojení s ostatními simulacemi a snadný export a import dat. V této práci do něj byla importována data z programu ANSYS Fluent a dále byl využit pro výpočet teplotního pole na řezu trubky. [17]

4.3.2 Dopočet vstupních hodnot materiálových charakteristik

Jak už bylo napsáno v předchozí podkapitole, pro dopočet vstupních parametrů spalin byl použit program CHEMCAD, ve kterém bylo vytvořeno zjednodušené procesní schéma (zobrazené na obrázku 31) skládající se ze vstupujícího a vystupujícího proudu spalin a tepelného výměníku. Teplota spalin je 1600 °C a tlak 102 kPa. Spaliny obsahují 13,5 % CO₂, 4,7 % O₂, 77,2 % N₂ a 4,6 % H₂O. Toto složení je mírně zjednodušené, skutečné složení spalin obsahuje ještě alkalické soli 500 ppm SO₂, 3,5 ppm K₂SO₄, 1 ppm Na₂SO₄, 18 ppm KCl, 15 ppm NaCl a 9 ppm HCl. Jejich obsah je ale v porovnání s ostatními složkami obsaženými ve spalinách velmi malý, a proto byly alkalické soli ve výpočtu zanedbány.



Obrázek 31: Zjednodušené procesní schéma

Z výpočtu byly zjištěny základní parametry spalin, které byly dále využity jako jejich materiálové vlastnosti při výpočet teplotního zatížení trubek. Výsledné hodnoty jsou vypsány v tabulce 2.

Tabulka 2: Základní parametry spalin

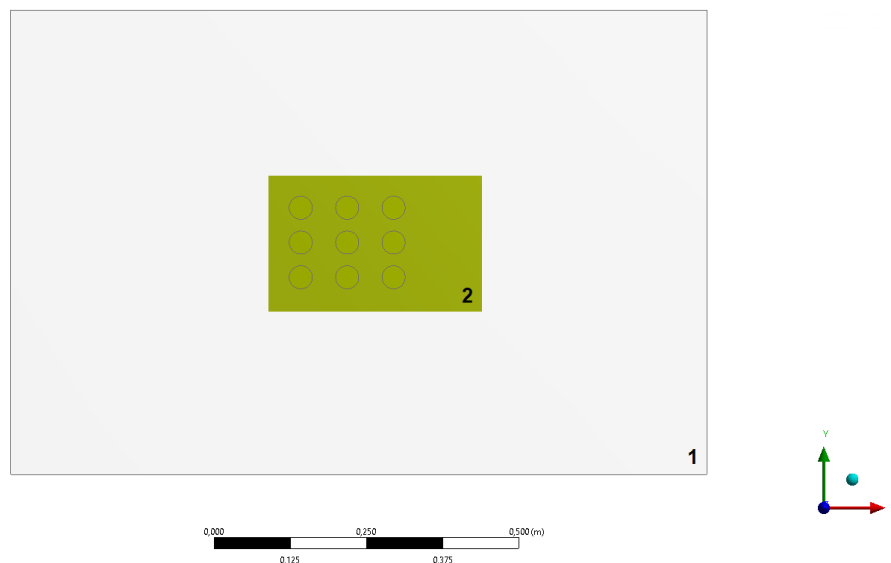
	Hodnota	Jednotky
Hustota	0,1959	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	1,3302	kJ/(kg·K)
Viskozita	6,25E-05	N·s/m ²
Tepelná vodivost	0,1139	W/(m·K)

Vzniklý nános je složený z oxidů, jako jsou oxid hlinitý, křemičitý a železitý. Jeho hustota je 2200 kg/m³, měrná tepelná kapacita je 2000 J/(kg·K) a tepelná vodivost je 2,1 W/(m·K). [10]

Trubky přehříváku mají průměr 38 mm a tloušťku 5,6 mm. Byly vyrobeny z žárupevné austenitické oceli 17 341, jejich hustota je 8000 kg/m³, měrná tepelná kapacita je 502 J/(kg·K) a tepelná vodivost 15,1 W/(m·K). [18]

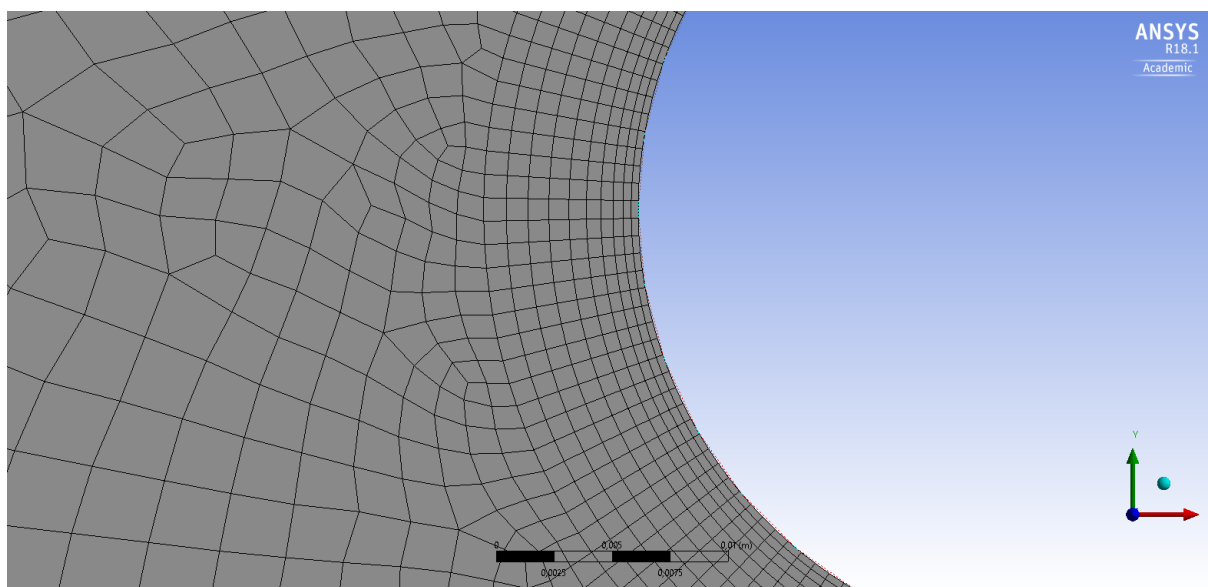
4.3.3 Model domény a jeho síť

Byly vytvořeny dva modely v programu SpaceClaim ve 2D, jeden s nezaneseným povrchem trubek a druhý se zaneseným povrchem. Ukázku modelu s nezaneseným povrchem trubek lze vidět na obrázku 32. Trubky byly umístěny do domény, jejíž velikost je 760 x 1140 mm a byla vypočtena dle J. Buzíka.[19]. V doméně je devět trubek, jejichž vertikální rozteč je 57 mm a horizontální 76 mm. První řada trubek je umístěna 475 mm od vstupu do domény (zleva) a horizontálně jsou trubky umístěny doprostřed domény. Následně byla pomocí programu ANSYS Workbench vytvořena hexagonální síť.



Obrázek 32: Model domény s nezaneseným povrchem trubek (1)
a pomocná plocha sloužící k zjemnění sítě (2)

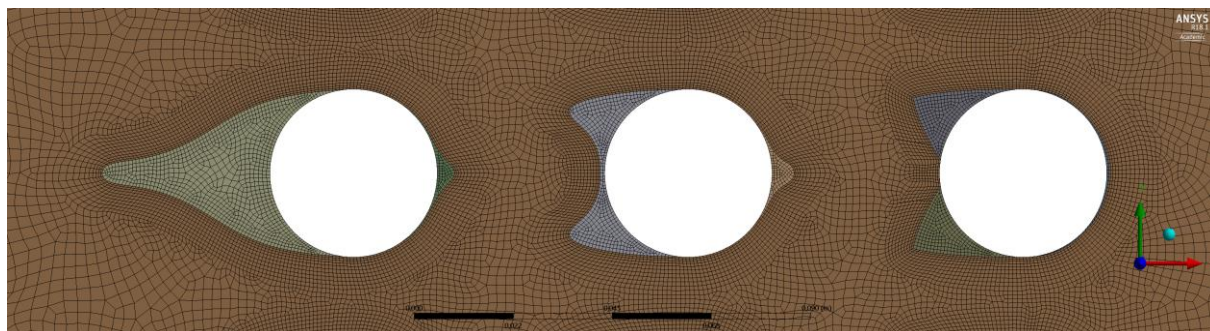
Detail sítě pro případ nezanesených trubek je zobrazen na obrázku 33. Síť je složena z 30 246 buněk. Na celkovou oblast domény byla použita metoda „quadrilateral dominant“, která zabrání tvorbě tetrahedrálních buněk a zajistí vytvoření hexagonálních buněk. V okolí trubek byla síť zjemněná pomocí funkce inflation. Tato funkce zajistí postupné zvětšování buněk s jejich rostoucí vzdáleností od povrchu trubky. Nejprve bylo použito více vrstev s užšími elementy a delšími po obvodu trubky, což se při výpočtu jeví jako nevhodné a výsledná funkce „inflation“ byla nadefinována v 10 vrstvách buněk, kde první buňka má velikost 0,3 mm a po obvodě trubky jsou buňky 1 mm široké.



Obrázek 33: Detail sítě na modelu s nezanesenými trubkami

Byl vytvořen dodatečný povrch v okolí trubek, který je možné vidět na obrázku 32 s označením 2, díky němuž mohla být využita funkce „body sizing“ a byly vytvořeny jemnější buňky v celkovém okolí trubek pro kvalitnější simulaci proudění. Od tohoto povrchu buňky pozvolna rostou do zbylé části domény, kde není potřeba aby síť byla tak jemná.

Dále byla vytvořena síť na modelu se zanesenými trubkami, jejíž detail je na obrázku 34. Z počátku byla použita hrubší síť s menším počtem buněk, což se při použité výpočetní metodě jevílo jako nevhodné, a proto je výsledná síť složena z 40 768 buněk. V oblasti domény byla použita metoda „quadrilateral dominant“ tvořící primárně hexagonální buňky. Obdobně jako u sítě s nezanesenými buňkami byla využita funkce „inflation“ s postupně se zvětšujícími buňkami, ale tentokrát od hran nánosů, v 10 vrstvách, kde první vrstva je 0,4 mm široká a velikost elementů po obvodu nánosů je 0,8 mm. Také byl vytvořen dodatečný povrch a využita funkce „body sizing“ pro zjemnění buněk v oblasti trubek.



Obrázek 34: Detail sítě na modelu se zanesenými trubkami

Kvalita sítě byla posouzena pomocí tří parametrů a to „skewness“, „aspect ratio“ a y^+ faktoru, jejichž výsledné hodnoty vyhovují níže popsaným požadavkům a jsou uvedeny v tabulce 3. Hodnota „skewness“ neboli zkosení uvádí do jaké míry je tvar buňky ideální na stupnici od 0 do 1, kde 0 je nejlepší a 1 je nejhorší. Buňky, které jsou velmi zkosené, snižují přesnost výpočtu a mohou způsobit problémy s konvergencí. Maximální hodnota by měla být menší než 0,95 a průměrná hodnota pro 2D úlohy by měla být přibližně 0,1. [20]

Dále byla kontrolována hodnota „aspect ratio“, která je vypočítána z poměrů stran jednotlivých buněk a určuje míru protažení buňky. Obecně je vhodné vyhnout se velmi protáhlým buňkám v oblastech, které vykazují velké změny toku a je doporučeno, aby byla hodnota „aspect ratio“ menší než 5. [20]

Poté byl hodnocen parametr y^+ , který při použití stěnových funkcí hodnotí kvalitu sítě v mezních vrstvách. Pro zvolenou výpočetní metodu má být hodnota y^+ přibližně jedna. Zpočátku byl s tímto parametrem problém, protože jeho velikost byla velmi malá. Ta je ovlivněna velikostí buněk u stěny, vlastnostmi a třecí rychlostí proudícího media, z čehož je patrné, že jediný parametr, kterým může být ovlivněna hodnota parametru y^+ je velikost buněk. Z počátku byly buňky v první řadě u stěny příliš úzké a dlouhé. Nakonec byl problém vyřešen pomocí funkce „sizing“, díky které bylo nastaveno dělení po obvodu trubky a tloušťka první vrstvy byla zvětšena. [20]

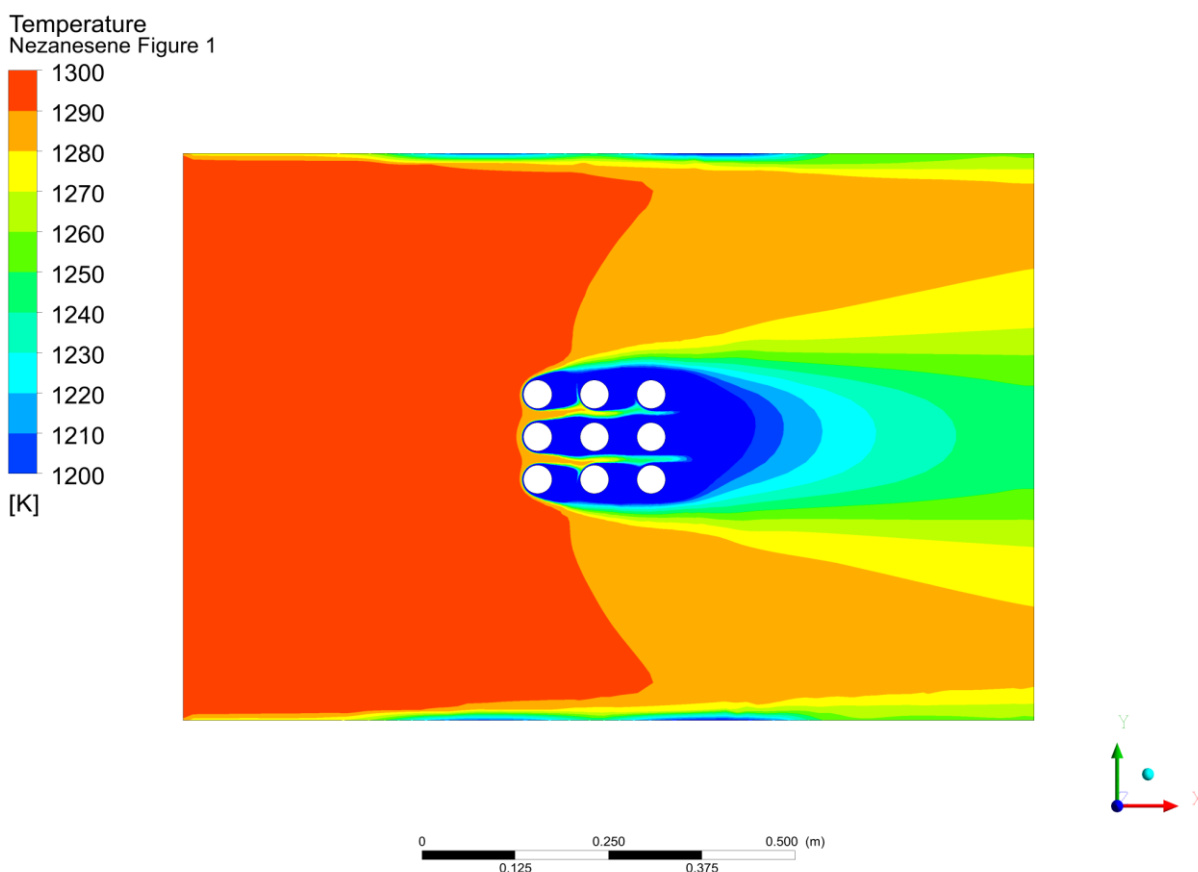
Tabulka 3: Hodnocení kvality sítě simulace proudění

	Nezanesené trubky	Zanesené trubky
Skewness	0,10	0,17
Aspect ratio	1,30	1,28
Parametr y^+	0,13	0,16

4.4 Výpočet proudění

Výpočty proudění spalin v okolí zanesených a nezanesených trubek, sloužící k určení teplotního zatížení a zjištění koeficientů přestupu tepla, byly provedeny pomocí programu ANSYS Fluent, který byl popsán v kapitole 4.3.1. V obou případech bylo předpokládáno stacionární proudění. Proudění spalin je v turbulentním režimu, a proto byl pro výpočet vybrán nejvyužívanější dvourovnicový model $k-\epsilon$ se stěnovou funkcí „Enhanced Wall Treatment“, protože bylo potřeba zajistit přesnou simulaci proudění a přenosu tepla v blízkosti stěn trubek a nánosu. Také byly využity modely pro výpočet energie a radiace, které umožní nastavit parametry související s přenosem tepla.

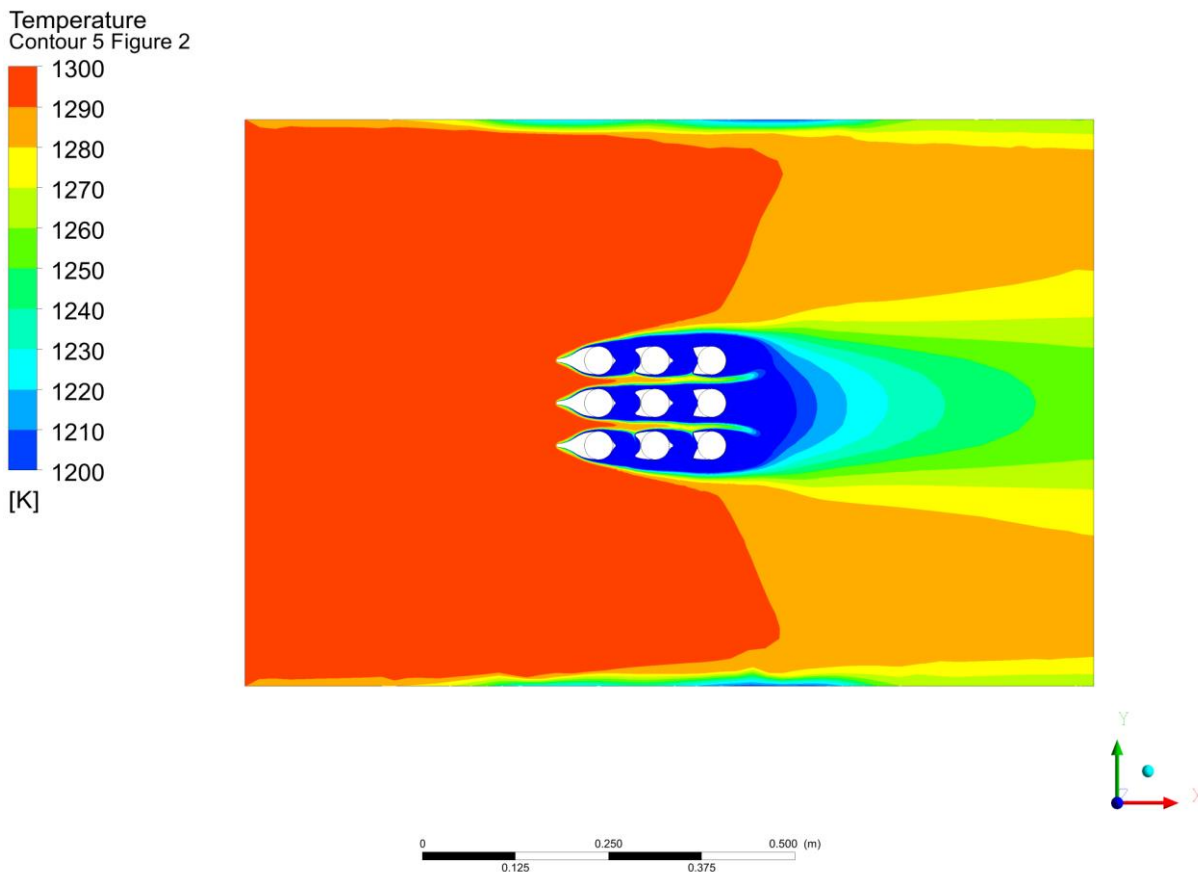
V obou výpočetních modelech byly použity stejné materiálové charakteristiky, které byly uvedeny v předchozí podkapitole 4.3.2 a byly zadány okrajové podmínky. Vstup byl definován pomocí parametrů spalin, které vstupují do domény rychlostí 8,36 m/s a jejich teplota je 1300 K. Jedním z klíčových parametrů mající vliv na rozložení teploty je absorpční koeficient. Nejprve byl tento koeficient odhadnut v rozmezí 0,1-0,4 a byly zkoušeny různé možnosti. Nakonec byl dopočítán pomocí UDF a jeho výsledná hodnota je 0,4370722. Dále bylo stanoveno chlazení na vnitřní straně trubek médiem, kterým byla pára o teplotě 800 K. [10, 21]



Obrázek 35: Průběh teploty spalin v modelu s nezanesenými trubkami v rozmezí teplot 1200-1300 K

Byl proveden výpočet, jehož konvergence byla sledována pomocí reziduí, které ukazují, do jaké míry jsou splněny příslušné rovnice při každé iteraci. [20]

Výsledné teplotní průběhy byly vykresleny pomocí programu CFD-Post a jsou zobrazeny na obrázcích 35 a 36. Pro názornější zobrazení bylo vybráno stejné rozmezí teplot a to od 1200 K do 1300 K, kde je rozdíl nejvíce patrný. Na obrázcích je možné vidět, že spaliny jsou chlazený méně v případě, kdy je na trubkách nános než v případě nezanesených trubek.



Obrázek 36: Průběh teploty spalin v modelu se zanesenými trubkami v rozmezí teplot 1200-1300 K

V tabulce 4 jsou vypsány průměrné teploty vypočítané na povrchu jednotlivých trubek z nichž je patrné, že trubky pokryté nánosem jsou spalinami ohřívány méně než trubky bez nánosu, což má za následek také snížení účinnosti přenosu tepla, který bude zkoumán v další kapitole.

Tabulka 4: Průměrné teploty na povrchu jednotlivých trubek

	Průměrná teplota (K)		
	První trubka	Druhá trubka	Třetí trubka
Nezanesené trubky	853	840	840
Zanesené trubky	820	822	817

Dále bylo pro oba modely vyexportováno rozložení teplot a koeficientů přestupů tepla, které byly vypočteny na hranách první, druhé a třetí trubky ležící v prostřední řadě. Detailní rozložení teplot na vnějším povrchu jednotlivých trubek je uvedeno v příloze A. Data bylo potřeba převést do souboru typu CSV, aby mohla být importována jako okrajová podmínka do statické termální analýzy.

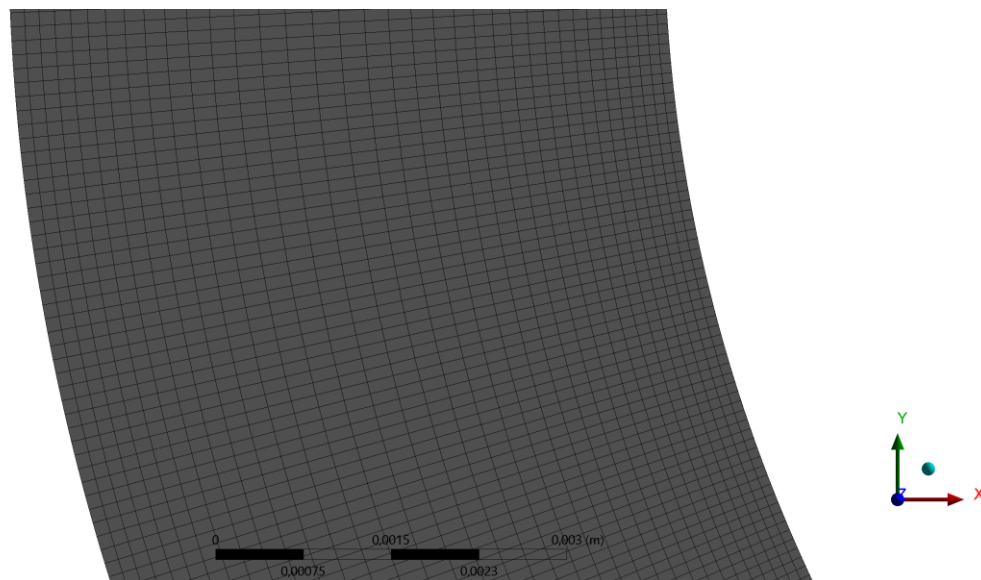
5 Určení poškození kritických částí vlivem teploty

Dále byl proveden výpočet teplotního pole pro určení kritických částí. V prvním kroku byl vytvořen nový 2D model trubky, na jehož vnější hranu bylo naimportováno vypočtené teplotní zatížení a koeficienty přestupu tepla z programu ANSYS Fluent a vnitřní stěna trubky byla zatížena konstantní teplotou a konstantním součinitelem přestupu tepla. Pomocí analýzy „Steady-state thermal“ programu ANSYS Workbench, který byl popsán v kapitole 4.3.1, bylo vypočteno teplotní pole na řezu trubkou.

5.1 Model trubky a síť

Pro veškeré analýzy byl vytvořen 2D model trubky o průměru 38 mm a tloušťce 5,6 mm, který byl umístěn do souřadnicového systému přesně podle toho, kde se jednotlivé trubky vyskytovaly. Jednotlivé modely se liší pouze souřadnicí X podle toho, jestli se jedná o první, druhou nebo třetí trubku.

Dále byla vytvořena síť skládající se z 35 856 buněk, přičemž po vnitřním i vnějším obvodu byla rozdělena na 1000 dílků pomocí funkce „edge sizing“. Na celou plochu trubky byla použita funkce „face meshing“ pro rovnoměrné rozložení buněk po celém povrchu.



Obrázek 37: Část sítě modelu trubky

Kvalita sítě byla hodnocena pomocí parametru „skewness“, jehož průměrná hodnota je $3,81 \cdot 10^{-3}$. Dále byl využit parametr „aspect ratio“, jehož průměrná hodnota je 1,54. Tyto hodnoty jsou vyhovující dle kritérií, které byly uvedeny v kapitole 4.3.3. Detailní rozložení obou parametrů je možné vidět v grafech v příloze B.

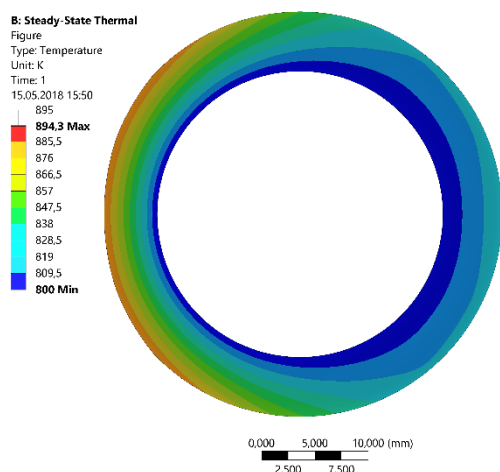
5.2 Teplotní analýza

Po odladění sítě byl proveden výpočet rozložení teploty po průřezu trubky v programu ANSYS Workbench s využitím analýzy Steady-state thermal. Tato analýza slouží k výpočtu teplot, teplotních gradientů a tepelných toků, které se v čase nemění.

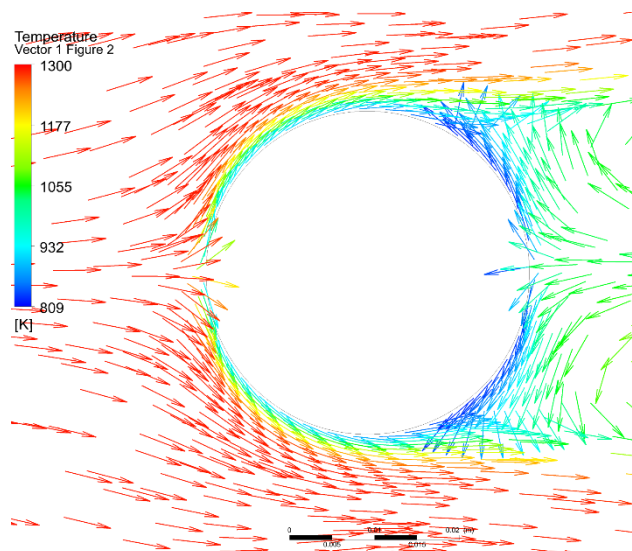
Při výpočtu bylo potřeba zadat tepelnou vodivost materiálu trubek 17 341, která je $15,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [18]. Dále byly použity 4 okrajové podmínky. Na vnější hranu trubky byly naimportovány výsledné teploty a koeficienty přestupů tepla ze simulace proudění uvedené

v kapitole 4.4. Detailní rozložení teplotního zatížení je uvedené v příloze A. Vnitřní povrch trubek je chlazen parou, která má konstantní teplotu, proto byla na vnitřní hranu trubky nastavena konstantní teplota chladného média 800 K. Páre o této teplotě a tlaku 11 MPa odpovídá konstantní koeficient přestupu tepla $1600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

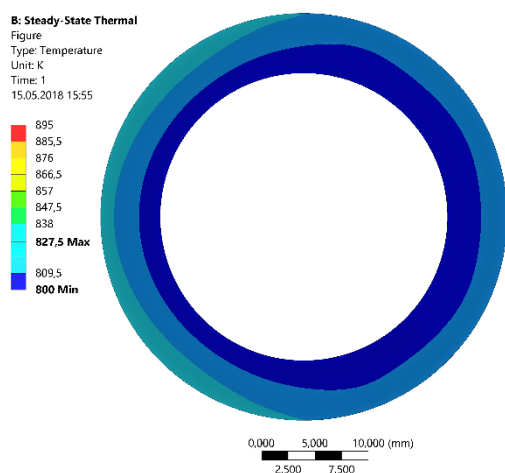
Byl proveden výpočet teplotního zatížení a z výsledků je patrné, že zanesené trubky jsou spalinami ohřívány mnohem méně než nezanesené. Na obrázcích 38a 40 je možné vidět porovnání první nezanesené a zanesené trubky. Nezanesená trubka je z přední strany spalinami ohřívána na 894 K, zatímco druhá trubka je z této strany téměř kompletně pokryta nánosem a teplota pod ním dosahuje pouze okolo 830 K, což je lépe znázorněno na obrázcích 39 a 41.



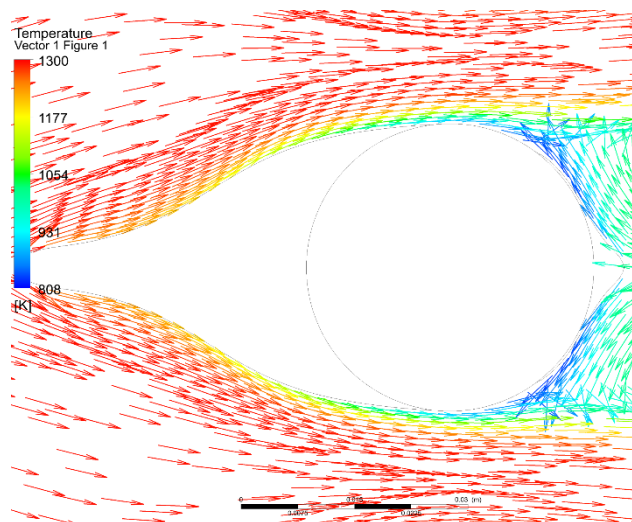
Obrázek 38: Průběh teploty na povrchu první nezanesené trubky



Obrázek 39: Teplotní průběh spalin okolo první nezanesené trubky



Obrázek 40 Průběh teploty na povrchu první zanesené trubky

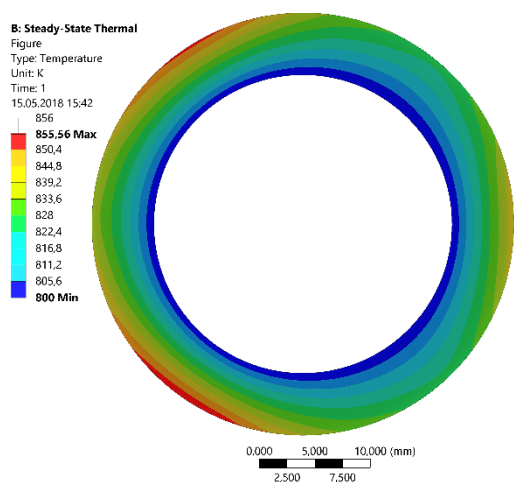


Obrázek 41: Teplotní průběh spalin okolo první zanesené trubky

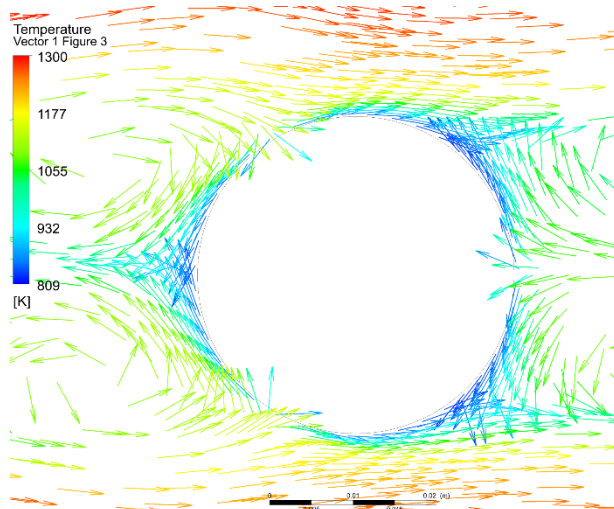
Průměrná teplota, na kterou je zahříván průřez první nezanesené trubky, je 826 K, kdežto teplota na průřezu zanesené trubky je o 16 K nižší, pouhých 810 K. Nejvyšší dosažená teplota na zanesené trubce dosahuje 827,5 K, a to na horní – přední a dolní – přední straně trubky,

kde není nános a povrch trubky je v přímém kontaktu se spaliny. Obě trubky jsou velmi málo zahřívány ze strany odtoku spalín, což může být způsobeno tím, že tam spaliny téměř neproudí a po obečení trubky pokračují přímým směrem.

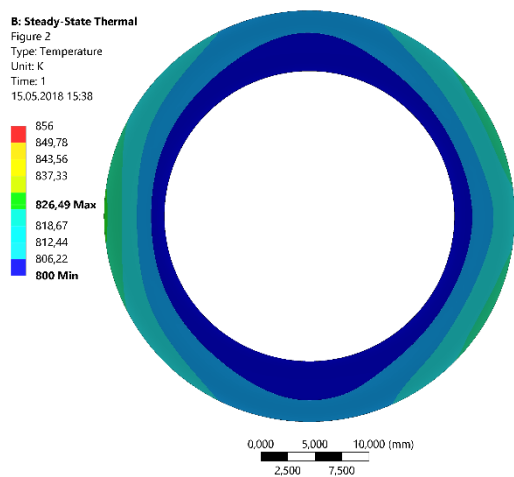
Ukázky teplotních průběhů na druhých trubkách jsou na obrázcích 42 a 44. V případě druhé nezanesené trubky dochází k největšímu ohřevu v horní a dolní části trubky ze strany přítoku spalín, a to až na teplotu 855,6 K, zatímco ve střední části se trubka ohřívá na nižší teplotu, a to ze stejného důvodu jako v případě první trubky, ze strany odtoku spaliny, kde spaliny pokračují ve své trajektorii a v těchto místech už nemají dostatečnou intenzitu, což je možné vidět na obrázku 43. Průměrná teplota povrchu této trubky dosahuje 819 K.



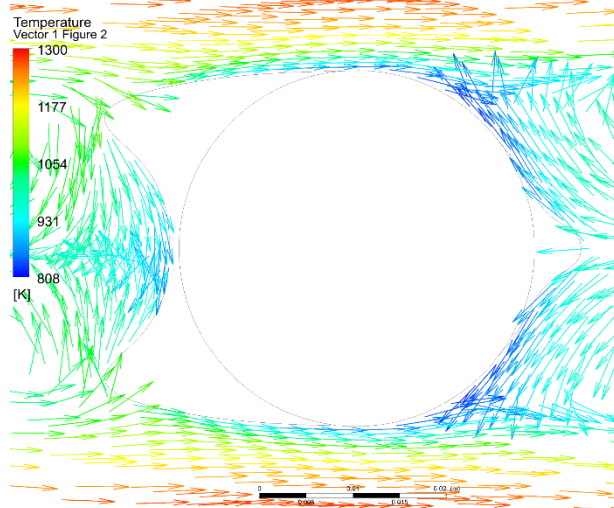
Obrázek 42: Průběh teploty na povrchu druhé nezanesené trubky



Obrázek 43: Teplotní průběh spalín okolo druhé nezanesené trubky



Obrázek 44: Průběh teploty na povrchu druhé zanesené trubky

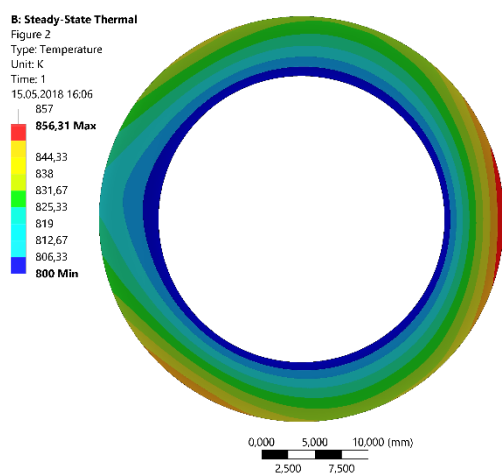


Obrázek 45: Teplotní průběh spalín okolo druhé zanesené trubky

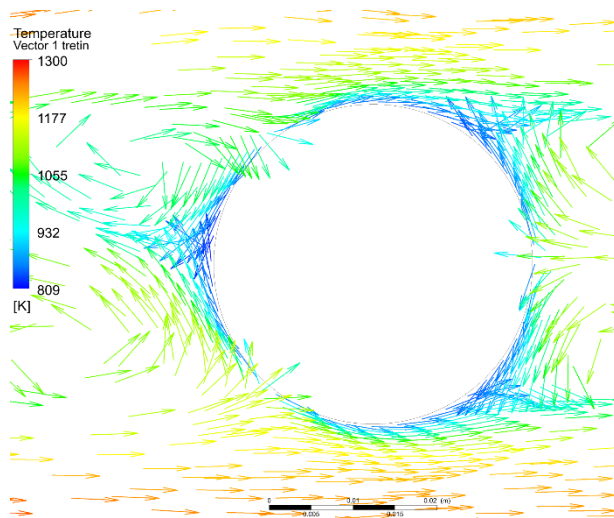
Druhá zanesená trubka je nejvíce zahřívána ve střední části, ze strany přítoku spalín, a to na teplotu 826 K, což je jediné místo, kde trubka není pokryta nánosem, viz obrázek 45. V průměru je průřez trubky zahřát na teplotu 808 K. Dále je možné si všimnout, že zadní strana

druhých trubek je více ohřívána než zadní strana prvních trubek, což je způsobeno vyšší intenzitou spalín proudících za druhými trubkami.

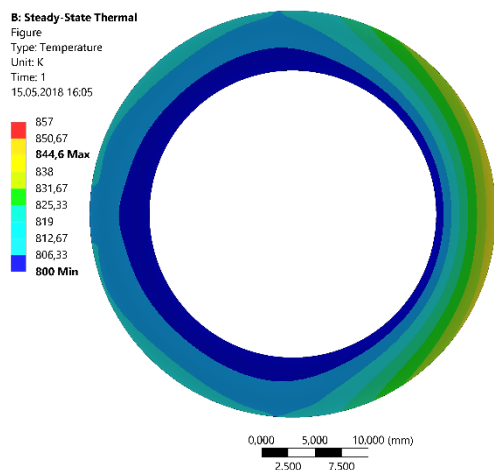
Na obrázcích 46 a 48 jsou zobrazeny vypočtené průběhy teplot na řezu třetí nezanesené a zanesené trubky. Spaliny proudící na přední část trubky nemají dostatečnou intenzitu a tato část je v obou případech zahřívána velmi málo, viz obrázky 47 a 49. Větší intenzity dosahují v zadní části trubky, která je ohřívána podstatně více. Tím pádem je třetí nezanesená trubka nejvíce zahřívána ze strany odtoku spalín, kde teplota dosahuje 856,3 K a dále pak ve spodní části ze strany přítoku spalín, průměrná teplota na povrchu této trubky dosahuje 819 K. Obdobně vypadá průběh teploty v případě třetí zanesené trubky, která je nejvíce zahřívána ve stejném místě jako trubka nezanesená na teplotu 844,6 K, i přes tenkou vrstvu nánosu. Na přední straně této trubky je silná vrstva nánosu, která brání jejímu zahřívání a teplota zde dosahuje pouze okolo 820 K a průměrná teplota na povrchu této trubky je 812 K.



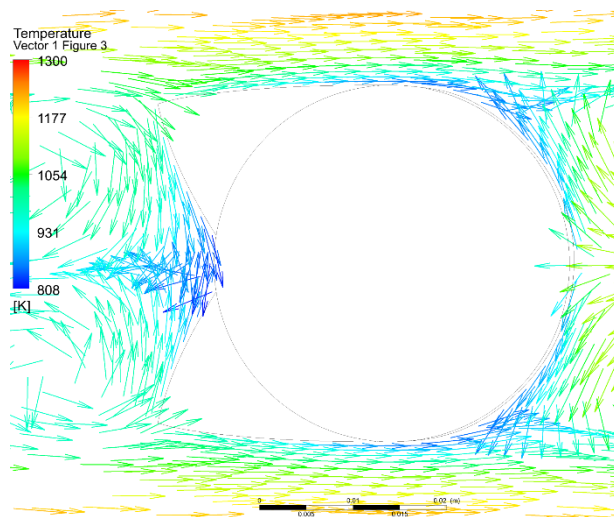
Obrázek 46: Průběh teploty na povrchu třetí nezanesené trubky



Obrázek 47: Teplotní průběh spalín okolo třetí nezanesené trubky



Obrázek 48: Průběh teploty na povrchu třetí zanesené trubky



Obrázek 49: Teplotní průběh spalín okolo třetí zanesené trubky

Z výše uvedených výsledků je patrné, že teplota na trubkách s nánosem je nižší než na trubkách bez nánosu. Rozložení teploty na zanesených trubkách kopíruje rozložení nánosu, což je nejlépe vidět na prvních dvou trubkách, na kterých je dosaženo nejvyšších teplot přesně v oblastech, kde není nános, a naopak nejnižších tam, kde je povrch zakryt nánosem. Je tedy možné říct, že nános působí jako izolant. Je zajímavé, že velmi malá vrstva nánosu má poměrně malý vliv průběh teploty pod ním, tak jak je tomu v případě třetí zanesené trubky, kde je teplota v zadní části podobná s trubicí nezanesenou.

Průběhy teplot byly vyexportovány pomocí makra, pro jehož správné fungování bylo potřeba vytvořit pojmenované výběry „named selection“, ze kterých si pak makro vezme požadované hodnoty. Makro počítá teploty v jednotlivých prvcích sítě „mesh element“, ale pojmenovaný výběr na nich nelze přímo vytvořit. Proto byl nejprve vytvořen pomocný výběr označující tělo trubky „body“ a ten byl následně pomocí tabulky, která je zobrazena v příloze C, spolu s vlastnostmi materiálu trubek, převeden na prvky sítě. Následně je v sekci řešení pomocí „commands“, zavoláno makro, které vyexportuje teploty v závislosti na jednotlivých uzlech a souřadnicích jako CSV soubor.

6 Výpočet creepového poškození dle normy EN 12952-4

Vyhodnocení creepové životnosti jednotlivých trubek na základě průběhů teplot bylo provedeno dle normy EN 12952-4, což je základní evropská norma pro vyhodnocení creepu u vodotrubných kotlů, pomocí programovacího jazyka Python. Creep je časově závislý degradační mechanismus, při kterém dochází k tečení materiálu vlivem působícího napětí a rostoucí teploty. Tento výpočet vychází z vypočítaných hodnot teploty a tlaku, ze kterých lze vymezit skutečné primární napětí a očekávanou životnost [5, 22].

Tabulka 5: Odolnost materiálu 17 341 proti tečení [18]

Teplota	°C	550	560	600	620	640	660	680	700
RmT/10⁴	<i>MPa</i>	260	245	179	149	123	99	80	65
RmT/10⁵	<i>MPa</i>	196	180	118	96	76	60	46	37
RmT/2·10⁵	<i>MPa</i>	181	165	103	80	63	49	38	29

Pro výpočet je nejprve nutné definovat vstupní data. Základní geometrické údaje, které jsou shodné pro všechny trubky, jsou vypsány v tabulce 6. Tlak v potrubí je 11 MPa a jednotlivé průběhy teplot byly stanoveny v předchozí kapitole 5.2.

Tabulka 6: Základní geometrické údaje

Střední tloušťka stěny	<i>e_{ms}</i>	6	(mm)
Střední průměr stěny	<i>d_{ms}</i>	32	(mm)

Nejprve je vypočítána provozní mez pevnosti daného materiálu v závislosti na teplotě $R_{m/T_{op}}$, dle rovnice (6.3), která byla poté vykreslena do grafu spolu s ostatními creepovými charakteristikami materiálu 17 341, vycházejícími z tabulky 5.

$$k = \frac{\log \frac{R_{m/t_2}}{R_{m/t_1}}}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (6.1)$$

$$b = \log R_{m/t_1} - k \cdot \log t \quad (6.2)$$

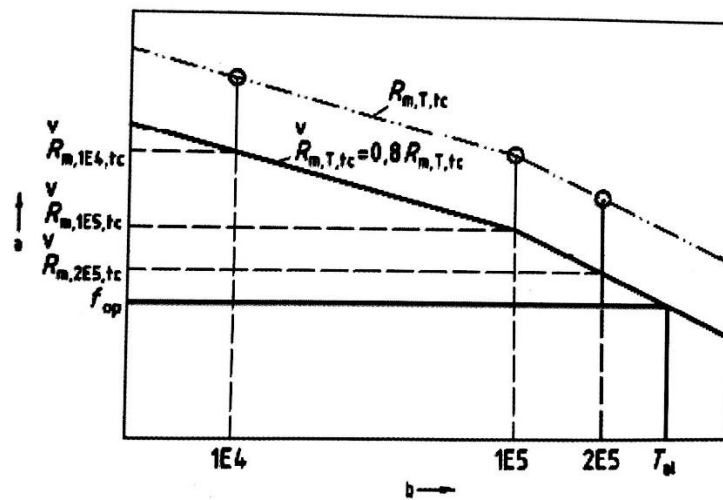
$$R_{m/t_{op}} = 10^{(k \cdot \log t_{op} + b)} \quad (6.3)$$

Dále bylo vypočteno membránové napětí při provozních podmínkách f_{op} , dle rovnice (6.4), jelikož nebyly známy průběžně naměřené hodnoty tlaku, byl pro výpočet použit provozní tlak pro 100 % zatížení pro dosažení konzervativnějšího odhadu [22].

$$f_{op} = \frac{d_{ms} + e_{ms}}{2 \cdot e_{ms}} \cdot p \quad (6.4)$$

$$T_{al} = \frac{\log \frac{f_{op}}{R_{m/T/t2}} \cdot \log \frac{t_2}{t_1}}{\log \frac{R_{m/T/t2}}{R_{m/T/t1}}} + \log t_2 \quad (6.5)$$

Nakonec byla z výše uvedených parametrů meze pevnosti a membránového napětí při provozních podmínkách odhadnuta teoretická doba života T_{al} , dle rovnice (6.5). Graficky lze tuto hodnotu stanovit podle obrázku 50 z průsečíku přímky membránového napětí f_{op} a dolní mezní křivky meze pevnosti při tečení materiálu $= 0,8 \cdot R_{m/T/tc}$ [22].



Obrázek 50: Diagram pro stanovení T_{al} [22]

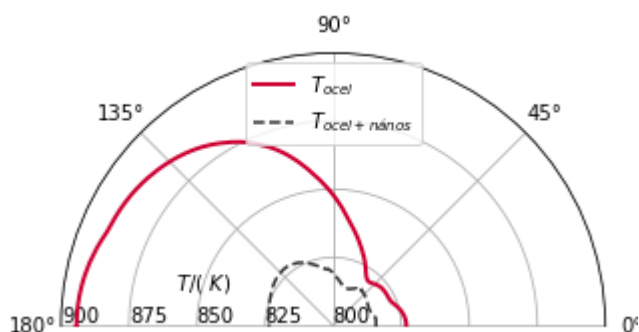
6.1 Teplotní zatížení a creepová životnost na jednotlivých trubkách

Výsledné rozložení teplot na řezu jednotlivých trubek, které bylo vypočteno v kapitole 5.2, bylo původně vyexportováno v kartézském souřadném systému. Poté bylo pomocí programovacího jazyka python přepočteno do polárního souřadného systému, aby mohly být vykresleny grafy závislosti jednotlivých průběhů teplot a životností na trubkovém obvodu Φ . V grafech jsou zobrazeny maximální hodnoty tepelného zatížení, které byly získány jako maxima v jednotlivých bodech řezem stěnou trubky.

Teplotní zatížení jednotlivých trubek je ovlivněno jejich postavením. Trubky v zákrytu (druhé a třetí) jsou zahřívány mnohem méně než první trubky. Velký vliv na teplotní zatížení má také nános. Trubky nezanesené jsou zahřívány více než zanesené, přičemž u zanesených trubek, pak záleží také na velikosti nánosu. V případě, že je vrstva nánosu velmi slabá, pak je často teplotní zatížení srovnatelné s trubkami nezanesenými, ale pokud je nános silný, je povrch zahříván velmi neefektivně.

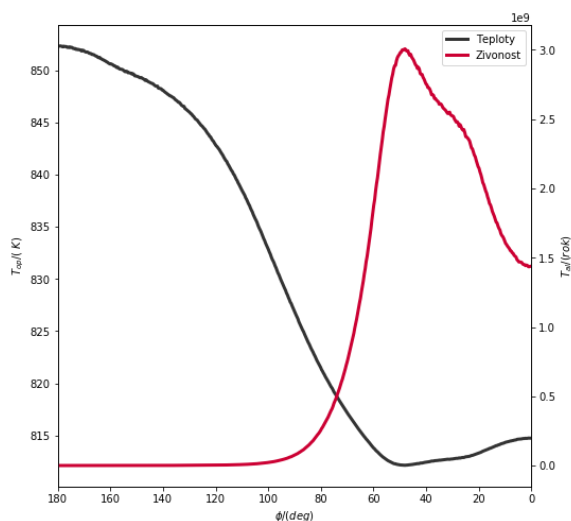
- Porovnání první nezanesené a zanesené trubky

Srovnání maximálního teplotního zatížení po obvodu první nezanesené a zanesené trubky je možné vidět na obrázku 51, kde je teplotní zatížení nezanesené trubky označené jako T_{ocel} a teplotní zatížení zanesené trubky je $T_{ocel+nános}$. Z obrázku je patrné, že přední část první nezanesené trubky je zatížena mnohem více než přední část trubky zanesené, která je pokryta silnou vrstvou nánosů. Naopak zadní části obou trubek jsou zahřívány mnohem méně, jelikož spaliny proudící v této části nedosahují tak vysoké intenzity. Tyto teplotní rozdíly mají velký vliv na životnosti jednotlivých trubek, které jsou zobrazeny na následujících grafech.

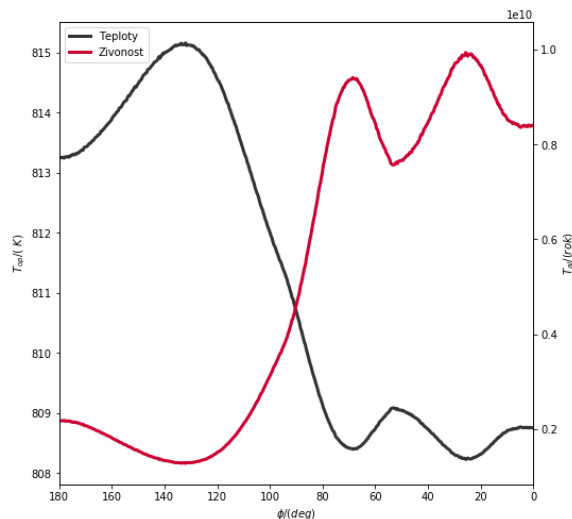


Obrázek 51: Srovnání maximálního teplotního zatížení první nezanesené a zanesené trubky

Na obrázku 52 je zobrazen průběh teploty a odhadovaná životnost na polovině první nezanesené trubky. Jak již bylo zmíněno výše k největšímu teplotnímu zatížení dochází v její přední části, na kterou proudí horké spaliny a dále po obvodu teplota postupně klesá a životnost roste, až na zadní straně této trubky dojde k mírnému zvratu – teplota mírně vzroste a životnost prudce klesá.



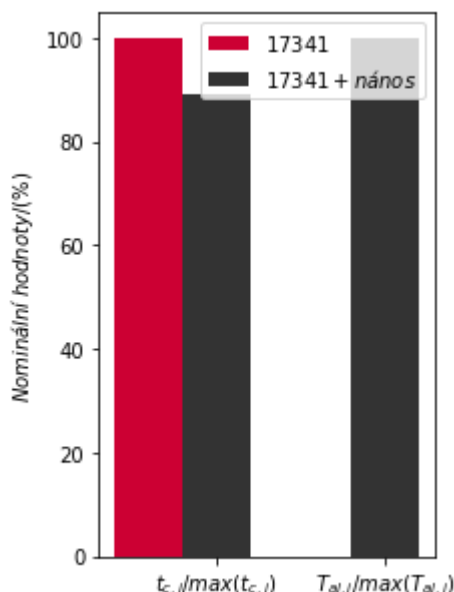
Obrázek 52: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení první nezanesené trubky v závislosti na jejím obvodu



Obrázek 53: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení první zanesené trubky v závislosti na jejím obvodu

Průběh grafu životnosti a teploty pro první zanesenou trubku, zobrazený na obrázku 53 je zcela odlišný od průběhu grafu trubky nezanesené. V přední části trubky je teplota nízká a životnost

vysoká, protože je tato část pokryta velkou vrstvou nánosů. Postupně po jejím obvodu se vrstva nánosů zmenšuje, spaliny povrch trubky zahřívají na vyšší teplotu a životnost trubky klesá. Zadní část trubky, je obdobně jako u trubky nezanesené, teplotně zatěžovaná méně a její životnost je tak vyšší.

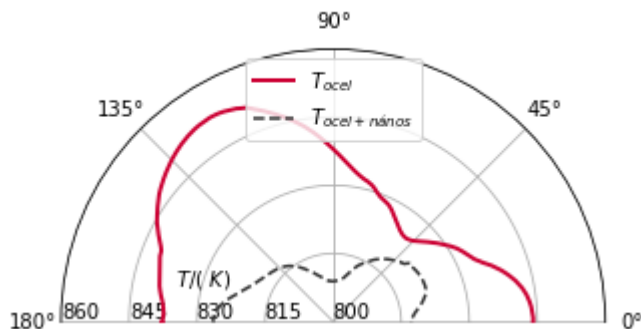


Obrázek 54: Porovnání maximálních teplot a odhadované životnosti pro první nezanesenou a zanesenou trubku

Na obrázku 54 je zobrazen graf, na kterém lze vidět porovnání jednotlivých parametrů první nezanesené trubky (v legendě označené jako 17341) a zanesené trubky (17341+nános). Maximální dosažená teplota t_c je u nezanesené trubky vyšší, což způsobí, že předpokládaná životnost $T_{a,i}$ je u této trubky $68 \cdot 10^3$ krát nižší než u trubky zanesené. I přes to je však odhadovaná hodnota životnosti nezanesené trubky dostatečně vysoká a creepové poškození se nepředpokládá.

- Porovnání druhé nezanesené a zanesené trubky

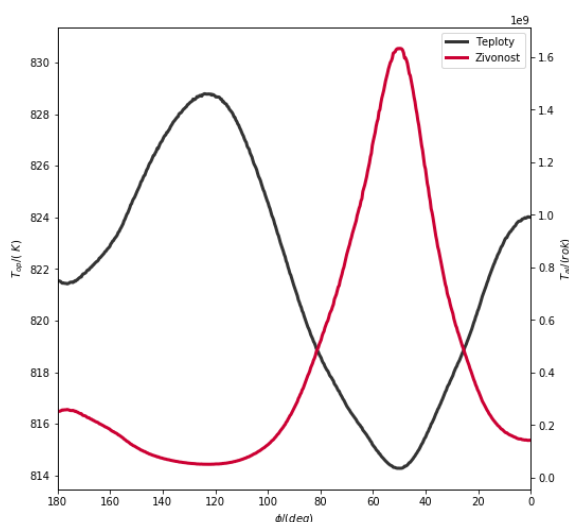
Dále je možné vidět srovnání průběhů maximálních teplot na povrchu druhé nezanesené (T_{ocel}) a zanesené trubky ($T_{ocel+nános}$) na obrázku 55, ze kterého je patrné, že přední část trubek je zahřívána méně než u první řady trubek, jelikož jsou trubky v zákrytu. V horní přední části (okolo 125°) a zadní části nezanesené trubky dochází k zahřívání mnohem intenzivněji než ve stejných oblastech trubky zanesené, která je v těchto místech pokryta vrstvou nánosů.



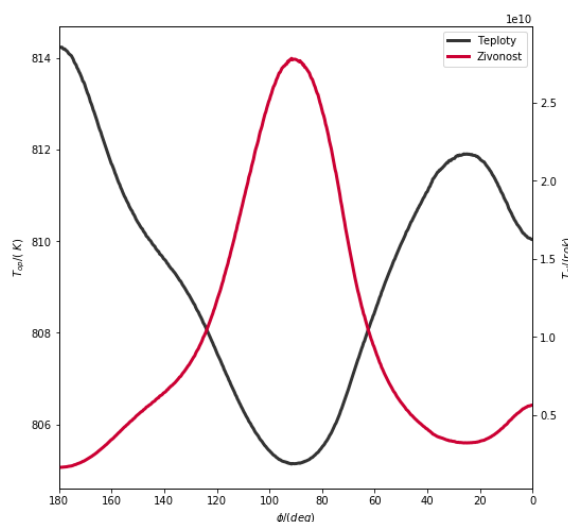
Obrázek 55: Srovnání maximálního teplotního zatížení druhé nezanesené a zanesené trubky

Graf průběhu creepové životnosti a teploty po obvodu druhé nezanesené trubky je možné vidět na obrázku 56. Jak již bylo zmíněno výše, tato trubka je nejvíce teplotně zatížena v přední horní části a zadní části, kde je životnost této trubky nejnižší. V ostatních oblastech této trubky proudí spaliny s nižší intenzitou. Celkově je povrch této trubky namáhán méně než povrch první nezanesené trubky a její životnost je 430krát větší, protože je v zákrytu.

Téměř celý povrch druhé zanesené trubky je pokryt vrstvou nánosů. K největšímu teplotnímu zatížení druhé zanesené trubky, a tedy nejnižší creepové životnosti, dochází v její přední části, kde je vrstva nánosů poměrně tenká, což je zobrazeno na obrázku 57. Poté vrstva nánosů sílí, teplota klesá a životnost se zvyšuje. K malému vzestupu teploty a snížení creepové životnosti dochází ještě v zadní – horní části trubky (od 45°), kde je trubka pokryta tenkou vrstvou nánosů a zároveň okolo proudí spaliny s vysokou intenzitou. Ve srovnání s nezanesenou trubkou však povrch není příliš teplotně namáhán a nedochází k výraznému snížení creepové životnosti materiálu.

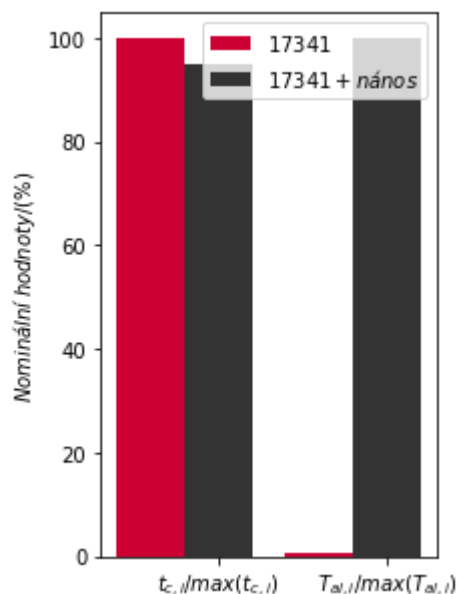


Obrázek 56: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení druhé nezanesené trubky v závislosti na jejím obvodu



Obrázek 57: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení druhé zanesené trubky v závislosti na jejím obvodu

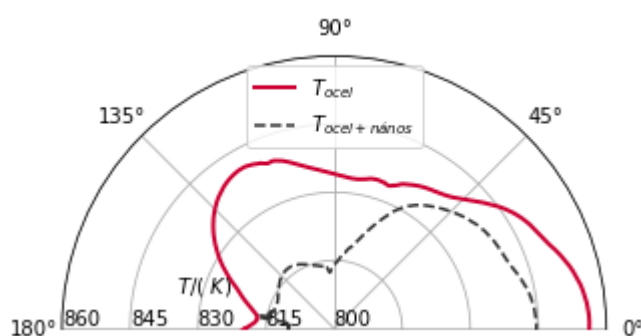
Porovnání jednotlivých parametrů druhé nezanesené trubky (v grafu označené 17341) a zanesené trubky (17341+nános) je zobrazeno v grafu na obrázku 58. Opět je pro případ nezanesené trubky maximální dosažená teplota na povrchu trubky t_c vyšší než v případě zanesené trubky, z čehož vyplývá, že také předpokládaná životnost nezanesené trubky T_{al} je 169krát nižší než zanesené.



Obrázek 58: Porovnání maximálních teplot a odhadované životnosti pro druhou nezanesenou a zanesenou trubku

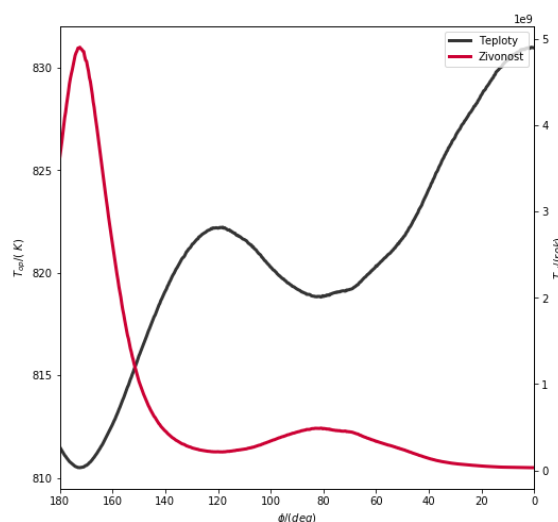
- Porovnání třetí nezanesené a zanesené trubky

Na obrázku 59 je zobrazen graf průběhů maximálního teplotního zatížení na třetí nezanesené (T_{ocel}) a zanesené trubce ($T_{ocel+nános}$). U obou trubek je nejvyšší teploty dosaženo v zadní části, protože zde proudí spaliny s největší intenzitou a zanesená trubka je v této části pokryta jen velmi tenkou vrstvou nánosů. Naopak v přední části trubek je povrchová teplota nižší, protože jsou trubky v zákrytu a proudící spaliny zde mají malou intenzitu. Pouze horní – přední část (okolo 130°) první nezanesené trubky je spaliny ohřívána, avšak v případě zanesené trubky je povrch v této části pokryt velkou vrstvou nánosů, který brání ohřívání jejího povrchu.

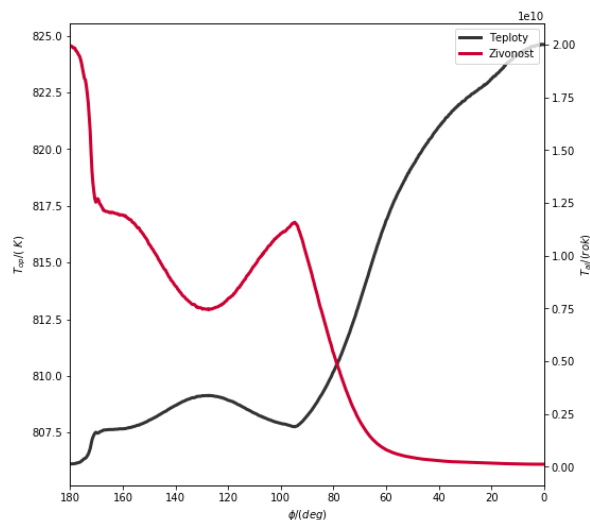


Obrázek 59: Srovnání maximálního teplotního zatížení třetí nezanesené a zanesené trubky

Průběh creepové životnosti a teplotního zatížení po obvodu třetích trubek se od předchozích značně liší, viz obrázky 60 a 61. Jak již bylo uvedeno výše, spaliny mají na přední části trubek velmi nízkou intenzitu, povrch je v této části zahříván na velmi nízkou teplotu a životnost je nejvyšší. U nezanesené trubky dochází v její přední – horní části k prudkému poklesu životnosti, která pozvolna klesá až do zadní části, kvůli zvýšení teploty. V případě zanesené trubky je povrch trubky zahříván méně, jelikož je trubka pokryta nánosy a životnost tak klesá pozvolněji. K nejvýraznějšímu poklesu životnosti dochází u obou trubek v jejich zadní části, kde je jejich povrch nejvíce teplotně zatížen, protože tam proudí spaliny s největší intenzitou a zanesená trubka je v této části pokryta nejslabší vrstvou nánosů.

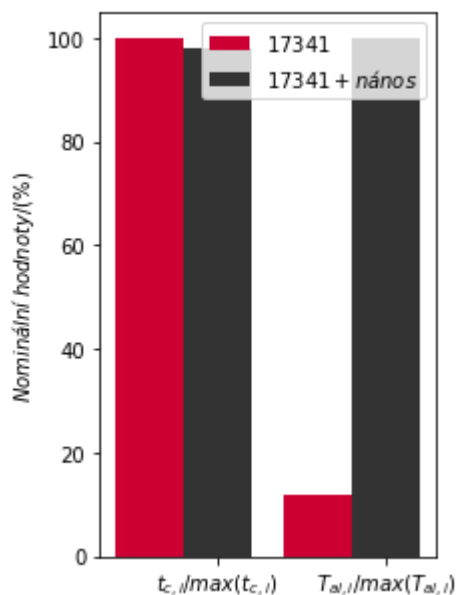


Obrázek 60: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení třetí nezašlešené trubky v závislosti na jejím obvodu



Obrázek 61: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení třetí zanesené trubky v závislosti na jejím obvodu

Na následujícím obrázku 62, je graf srovnávací jednotlivé parametry třetí nezašlešené trubky (označené jako 17341) a zanesené trubky (17341+nános), jehož průběh je velmi podobný předchozímu grafu srovnávacímu druhé trubky. Opět maximální teplota t_c vyšší než v případě zanesené trubky a rovněž také odhadovaná životnost T_{al} nezašlešené trubky je 8,3krát nižší než zanesené.



Obrázek 62: Porovnání maximálních teplot a odhadované životnosti pro třetí nezašlešenou a zanesenou trubku

6.2 Vyhodnocení creepového poškození

Výsledné hodnoty teoretické doby života jednotlivých trubek jsou vypsány v tabulce 7, ze které je patrné, že ocel 17 341 má velmi dobrou teplotní odolnost a při stanovených provozních podmínkách u ní v dohledné době nedojde k poškození creepem. Vykreslení creepových charakteristik materiálu 17 341 a křivky životnosti jednotlivých trubek jsou zobrazeny v příloze D.

Tabulka 7: Doba do dosažení teoretického porušení materiálu tečením

Doba do dosažení teoretického porušení materiál tečením			
	$T_{al} \text{ (h)}$		
	1. trubka	2. trubka	3. trubka
Nezanesená	8,54E+06	3,69E+09	3,05E+09
Zanesená	5,83E+11	7,23E+11	2,53E+10

7 Porovnání tepelných výkonů

Tepelný výkon byl vypočítán dle simulace uvedené v kapitole 5.2. Výpočet byl proveden na vnitřním povrchu jednotlivých trubek a výsledné hodnoty byly vyexportovány ve formátu CSV pomocí makra, které vygeneruje hodnoty tepelného zatížení v závislosti jednotlivých uzlech a souřadnicích X a Y.

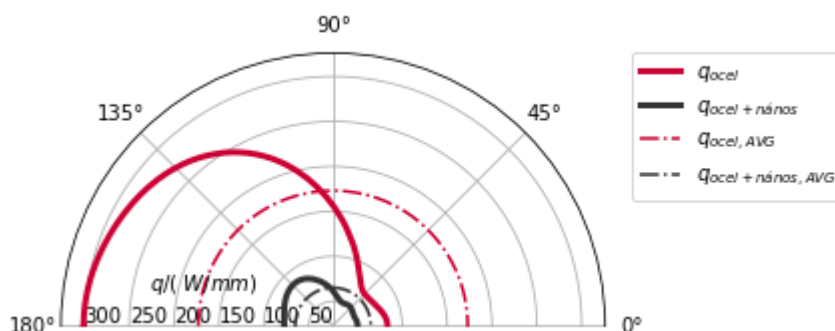
Pro fungování makra bylo nejprve potřeba pomocí programu ANSYS Mechanical vytvořit pojmenovaný výběr „named selection“, který označuje jednotlivé uzly „mesh node“, ve kterých je vyhodnocován tepelný tok. Jelikož nelze přímo vytvořit pojmenovaný výběr, který by označoval jednotlivé uzly, byl nejprve vytvořen výběr označující jednotlivé hrany „edge“, a poté další, pomocí kterého jsou hrany převedeny na uzly, ze kterých je makro schopno vyexportovat výsledné hodnoty. Tabulka nastavení pojmenovaných výběrů sloužící k převodu je uvedena v příloze C. V sekci řešení bylo pomocí příkazu „commands“ zavoláno makro, které vyexportuje výsledné hodnoty tepelného zatížení v závislosti na souřadnicích ve formátu CSV.

7.1 Vyhodnocení tepelného výkonu

Výsledné hodnoty tepelného zatížení byly vyhodnoceny pomocí programovacího jazyka Python. Byly vytvořeny grafy, které znázorňují porovnání průběhů tepelných zatížení zanesených a nezanesených trubek po jejich obvodu. Dále byly také vypočítány průměrné hodnoty tepelných výkonů na jednotlivých trubkách, které byly rovněž zaneseny do grafu.

- Porovnání první nezanesené a zanesené trubky

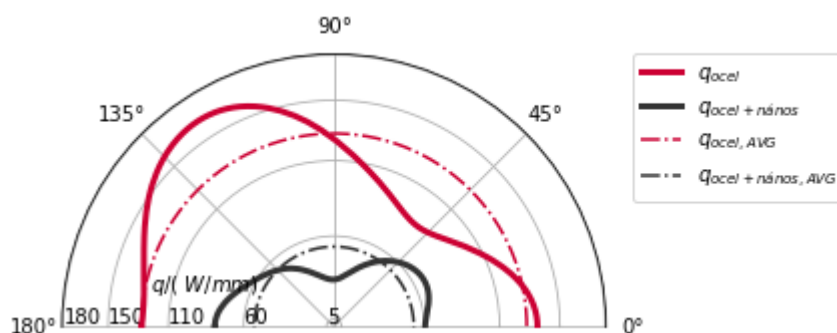
Na obrázku 63 jsou zobrazeny průběhy tepelných zatížení po obvodu první nezanesené (q_{ocel}) a zanesené trubky ($q_{ocel+nános}$). Z grafu je patrné, že zanášení velmi negativně ovlivňuje tepelné zatížení, protože na nezanesené trubce je zatížení mnohem vyšší než na trubce zanesené. Průměrná hodnota tepelného zatížení nezanesené trubky je v grafu zobrazena jako $q_{ocel,AVG}$ a dosahuje 173 W/mm. Tato hodnota koresponduje s tepelným výkonem o velikosti 14,1 kW. V případě zanesené trubky se hodnota tepelného zatížení rovná 65 W/mm, což odpovídá 5,3 kW tepelného výkonu. Průměrný tepelný výkon nezanesené trubky je 2,7krát větší než průměrný tepelný výkon zanesené trubky, označené jako $q_{ocel+nános,AVG}$. Nejefektivněji přenáší teplo přední část nezanesené trubky, na kterou působí spaliny s největší intenzitou. V zadní části je výkon podstatně nižší, jelikož intenzita spalin klesá.



Obrázek 63: Graf zobrazující průběhy tepelných zatížení po obvodu první nezanesené a zanesené trubky a jejich průměrné hodnoty

- Porovnání druhé nezanesené a zanesené trubky

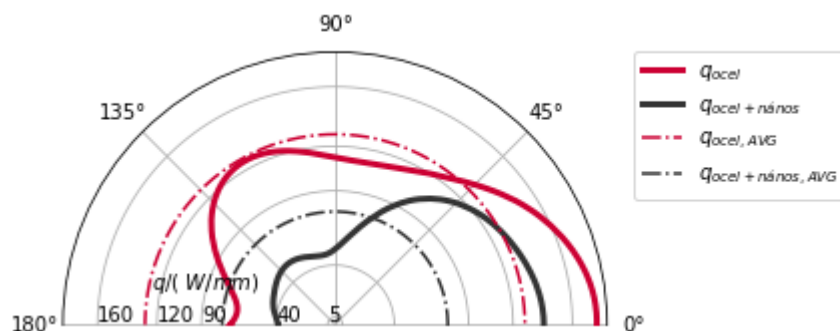
Průběhy tepelných zatížení po obvodu druhé nezanesené (q_{ocel}) a zanesené trubky ($q_{ocel+nános}$) jsou zobrazeny na obrázku 64, spolu s vypočtenými průměrnými hodnotami jednotlivých tepelných zatížení. Průměrné tepelné zatížení nezanesené trubky nabývá hodnoty 128 W/mm, což odpovídá tepelnému výkonu 10,5 kW. V grafu je tato hodnota označena jako $q_{ocel,AVG}$. Průměrná hodnota tepelného zatížení zanesené trubky dosahuje 53 W/mm, koresponduje s hodnotou tepelného výkonu 4,3 kW a v grafu je označena $q_{ocel+nános,AVG}$. Tepelný výkon druhých trubek je obecně nižší než u trubek prvních, protože jsou v zákrytu a spaliny, které kolem nich proudí nedosahují takové intenzity jako spaliny proudící okolo prvních trubek. Tepelný výkon nezanesené trubky je 2,4krát vyšší než tepelný výkon trubky zanesené. Je zřejmé, že je jeho velikost velmi ovlivněna vrstvou nánosů, která pokrývá primárně přední část druhé zanesené trubky, a pod níž dochází k velkému poklesu vedení tepla. Naopak v zadní části trubky (okolo 45°), kde je vrstva nánosů velmi tenká, dochází k přiblížení hodnoty tepelného výkonu nezanesené a zanesené trubky.



Obrázek 64: Graf zobrazující průběhy tepelných zatížení po obvodu druhé nezanesené a zanesené trubky a jejich průměrné hodnoty

- Porovnání třetí nezanesené a zanesené trubky

Na obrázku 65 je zobrazen průběh tepelných zatížení na obvodu třetí nezanesené (q_{ocel}) a zanesené trubky ($q_{ocel+nános}$). U obou trubek je nejvyšší dosažená hodnota tepelného zatížení v jejich zadní části, kde jsou trubky obtékány spalinami s největší intenzitou a zanesenou trubku v této části pokrývá pouze tenká vrstva nánosů. Většího rozdílu tepelných zatížení je dosaženo na přední straně trubek, kde je zanesená trubka pokryta silnou vrstvou nánosů, který brání jejímu ohřívání. V průměru je tepelné zatížení nezanesené trubky v grafu označené jako $q_{ocel,AVG}$, rovnou 128 W/mm, což odpovídá tepelnému výkonu 10,5 kW. Tepelné zatížení zanesené trubky, které je v grafu zobrazeno jako $q_{ocel+nános,AVG}$, dosahuje průměrné hodnoty 76 W/mm, která odpovídá 6,2 kW. Tepelný výkon zanesené trubky dosahuje 1,7krát menší hodnoty než tepelný výkon trubky nezanesené trubky.



Obrázek 65: Graf zobrazující průběhy tepelných výkonů po obvodu třetí nezanesené a zanesené trubky a jejich průměrné hodnoty

Z výsledných hodnot je patrné, že zanášení velmi nepříznivě ovlivňuje tepelný výkon. Je proto snaha tento typ poškození eliminovat, čehož lze dosáhnout například změnou složení spalin a podmínek spalování. Další možností je regulace toku spalin, například pomocí vestaveb, které tok zrovnoměří a částice se na trubkách nebudou tolik usazovat a budou proudit dál spolu s tokem spalin. Zanášení je možné ovlivnit už při samotném návrhu spalovacího zařízení, volbou optimálních rozměrů a tvaru spalovací komory, umístěním trubkových svazků apod. [1]

8 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provedení hodnocení vlivu zanášení na životnost trubky a tepelný výkon trubkového svazku. Vliv zanášení lze zkoumat dvěma hlavními způsoby, a to buď experimentálně, anebo numerickou simulací. Experimentální měření může poskytnout přesnější výsledky, avšak výstavba celé spalovací komory je časově ale i finančně velmi náročná. V této práci byl využit druhý, v dnešní době velmi rychle se rozvíjející, způsob numerického modelování pomocí metody CFD a MKP.

Úvodní část této práce je tvořena literární rešerší, která se nejprve zaměřuje obecně na problematiku kotlů, z čeho se skládají a jaké druhy poškození u nich mohou nastat. Dále je rešerše zaměřena konkrétně na proces zanášení, a nakonec byly shrnuty dosavadní poznatky z oblasti simulace tohoto procesu.

V praktické části byly za účelem simulace proudění nejprve vytvořeny dva 2D modely domény obsahující devět trubek, jeden s trubkami nezanesenými a druhý se zanesenými. Následně byla vytvořena síť, jejíž kvalita byla velmi důležitá pro následnou simulaci a byla proto v oblasti trubek velmi zjemňována. Simulace proudění spalín v okolí nezanesených i zanesených trubkových svazků byla provedena pomocí programu ANSYS Fluent, z jejíž výsledků je patrné, že v doméně trubkových svazků s nánosem dochází k menšímu ochlazování spalín a rovněž také k menšímu ohřevu trubkového povrchu krytého nánosem. Rozdíl je nejvíce patrný na prvních trubkách, kde zanesenou trubku pokrývá nejsilnější vrstva nánosu, která brání jejímu ohřevu, a naopak nezanesená trubka je v přímém kontaktu se vstupujícími spalínami, což způsobí 4 % rozdíl průměrných teplot na povrchu prvních trubek (kde průměrná teplota na nezanesené trubce dosahuje 853 K a na zanesené trubce 820 K). U druhých trubek tvoří rozdíl průměrných teplot 2,2 %, (kde průměrná teplota na nezanesené trubce je 840 K a na zanesené 822 K) a u třetích trubek dělá rozdíl teplot 2,8 % (840 K na nezanesené trubce a 817 K na zanesené).

Výsledná data byla dále využita jako zatížení v MKP teplotní analýze, pro kterou byly vytvořeny 2D modely řezů jednotlivých trubek. Výsledkem této analýzy byly průběhy teplot na řezu trubek a jejich tepelný tok na vnitřní stěně. Výsledné průběhy teplot na zanesených trubkách jsou silně ovlivněné nánosem, v jehož oblastech dochází k menšímu prohřátí povrchu trubky, zatímco povrch nezanesených trubek je prohříván na vyšší teplotu a rovnoměrněji. Největšího rozdílu teplot je dosaženo na prvních trubkách, kde je maximální dosažená teplota na nezanesené trubce 894,3 K, což je o 67 K vyšší teplota než na trubce zanesené (827,5 K). Na zbylých trubkách už rozdíly nejsou tak výrazné, u druhých trubek je rozdíl maximálních teplot 29 K (855,56 K na nezanesené a 826,49 K na zanesené) a u třetích trubek maximální teplotní rozdíl dosahuje 12 K (na nezanesené trubce je maximální teplota 856,3 K a na zanesené 844,6 K). V případě srovnání průměrných teplot, rozdíly nejsou tak markantní. Na povrchu první nezanesené trubky průměrná teplota dosahuje 826 K a na zanesené 810 K. Na povrchu druhých trubek je tvoří rozdíl průměrných teplot 11 K (819 K na nezanesené a 808 K na zanesené) a na povrchu třetích trubek se průměrné teploty liší o 7 K (průměrná teplota na nezanesené trubce je 819 K a na zanesené 812 K).

Výsledné teplotní zatížení jednotlivých trubek bylo dále využito pro hodnocení creepové životnosti, která s teplotním zatížením úzce souvisí. Čím je teplota vyšší, tím je creepová životnost nižší. Použité trubky byly vyrobeny z oceli 17 341, která má velmi dobrou teplotní odolnost. Tedy ani u první řady trubek bez nánosu, která je nejvíce teplotně zatěžována nehrozí v dohledné době ohrožení creepové životnosti, která byla odhadnuta na $8,55\text{E}+06$ h. U ostatních trubek je creepová životnost mnohonásobně vyšší.

V závěru práce byl proveden výpočet a porovnání tepelných výkonů nezanesených a zanesených trubek. Z výsledků je patrné, že vzniklý nános má na tepelný výkon velmi negativní vliv a pod silnou vrstvou nánosu dochází k výraznému poklesu tepelného výkonu. Nejvýraznější rozdíl je v tepelných výkonech první řady trubek, kde má nezanesená trubka průměrný výkon 14,1 kW a zanesená pouhých 5,3 kW, což je 2,7krát méně. U druhé řady trubek je tepelný výkon zanesené trubky 2,4krát menší a u třetí řady 1,7krát menší než u trubek nezanesených.

V případě, že by k takovému poklesu výkonu došlo v reálném provozu, pak by operátor pravděpodobně potřeboval zachovat pracovní podmínky stejné jako byly na počátku, tedy s nezanesenými trubkami. Musel by tedy zvýšit charakteristiku spalování, čímž by došlo k většímu teplotnímu zatížení trubkových svazků a pravděpodobně také k poklesu creepové životnosti. Tyto simulace již nebyly předmětem této diplomové práce, avšak mohly by být předmětem dalšího výzkumu.

Seznam zdrojů

- [1] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers for power and process* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2009 [vid. 2017-11-09]. ISBN 978-1-4200-7537-3. Dostupné z: <http://0-marc.crcnetbase.com.fama.us.es/isbn/9781420075373>
- [2] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers a practical reference* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2013 [vid. 2017-11-09]. ISBN 978-1-4665-0053-2. Dostupné z: <http://0-marc.crcnetbase.com.fama.us.es/isbn/9781466500549>
- [3] BALÁŠ, Marek, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ a FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [4] VLADISLAV POLACH. *Parní kotle* [online]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf
- [5] FLYNN, Daniel J., Robert D. PORT a NALCO CHEMICAL COMPANY, ed. *The nalco guide to boiler failure analysis*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-174300-6.
- [6] *Boiler Failure Mechanism: Long-Term Overheating / Engineering360* [online]. [vid. 2017-11-17]. Dostupné z: <http://insights.globalspec.com/article/4275/boiler-failure-mechanism-long-term-overheating>
- [7] KUKULKA, DAVID J., R. E. BAIER a J. C. MOLLENDORF. Factors Associated with Fouling in the Process Industry. *Heat Transfer Engineering* [online]. 2004, **25**(5), 23–29. ISSN 0145-7632. Dostupné z: doi:10.1080/01457630490458978
- [8] BAXTER, Larry L. Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach. *Biomass and Bioenergy* [online]. 1993, **4**(2), 85–102. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:10.1016/0961-9534(93)90031-X
- [9] BOTT, T. R. *Fouling of Heat Exchangers*. B.m.: Elsevier, 1995. ISBN 978-0-08-053190-8.
- [10] TOMECZEK, Jerzy a Krzysztof WACŁAWIAK. Two-dimensional modelling of deposits formation on platen superheaters in pulverized coal boilers. *Fuel* [online]. 2009, **88**(8), 1466–1471. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2009.02.023
- [11] *Condensation - The Water Cycle, from USGS Water-Science School* [online]. [vid. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclecondensation.html>
- [12] VENTURINI, Paolo, Domenico BORELLO, Kemal HANJALIĆ a Franco RISPOLI. Modelling of particles deposition in an environment relevant to solid fuel boilers. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2012, **49**, 131–138. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.08.030
- [13] MU, L., Q. QIU, J. CHEN, H. YIN, A. LI a X. CHI. Numerical investigation of ash particles deposition and distribution in a refining and chemical wastewater incineration

- equipment. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2016, **15**(1), 1–10. ISSN 0972-6268.
- [14] GARCÍA PÉREZ, Manuel, Esa VAKKILAINEN a Timo HYPPÄNEN. 2D dynamic mesh model for deposit shape prediction in boiler banks of recovery boilers with different tube spacing arrangements. *Fuel* [online]. 2015, **158**, 139–151. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2015.04.074
- [15] CHEMCAD | Chemical Engineering Simulation Software by Chemstations. *Chemstations 2018* [online]. [vid. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.chemstations.com/CHEMCAD/>
- [16] NAŘ, Martin. *Modelování procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [17] ANSYS Mechanical Enterprise / TechSoft Engineering, spol. s r.o. [online]. [vid. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/strukturalni-analyzy/ansys-mechanical-enterprise/>
- [18] ČSN 41 7341 (417341) *A Ocel 17 341 Cr-Ni-Mo*. B.m.: Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření. 1982
- [19] BUŽÍK, Jiří. *Analýza Cyklické únavy trubkového svazku vlivem proudění pracovního média* [online]. 2017. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=161642
- [20] ANSYS, INC. *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1*. 2018.
- [21] K. WATANABE, MURRAY ZELIKOFF, EDWARD C.Y. INN. *Absorption coefficients of several atmospheric gases*. 1953.
- [22] ČSN EN 12952-4 *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení - Část 4: Provozní výpočty očekávané doby života kotle*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní součásti kotle [1].....	5
Obrázek 2: Ekonomizér [4] (1 – spodní komora, 2 – vlastní trubky, 3 – horní komora, 4 – závěs trubek).....	6
Obrázek 3: Dlouhodobé přehřátí [5].....	7
Obrázek 4: Koroze oběžného kola čerpadla [5]	8
Obrázek 5: Nános na vnější straně trubek kotle [6].....	8
Obrázek 6: Tři fáze procesu zanášení [7]	10
Obrázek 7: Vlastní setrvačnost částic [8]	11
Obrázek 8: Termoforesce [8]	12
Obrázek 9: Kondenzace [8]	12
Obrázek 10: Chemická reakce [8]	13
Obrázek 11: Uspořádání trubek v přehříváku [10]	15
Obrázek 12: Tvar nánosů na trubkách přehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti 33 μm , $s_1/d = 1,5$, $s_2/d = 2$ [10].....	15
Obrázek 13: Tvar nánosů na trubkách přehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti 55 μm , $s_1/d = 1,5$, $s_2/d = 2$ [10].....	16
Obrázek 14: Tvar nánosů na trubkách přehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti 33 μm , $s_1/d = 5$, $s_2/d = 2$ [10].....	16
Obrázek 15: Tvar nánosů na trubkách přehříváku po 9 měsících provozu, zanášení částicemi o velikosti 1 μm , $s_1/d = 5$, $s_2/d = 1,2$ [10].....	16
Obrázek 16: a) Stopa částice o velikosti 33 μm okolo prvních dvou trubek v konvekční části; b) Stopa částice o velikosti 50 μm okolo prvních dvou trubek v konvekční části [10]	17
Obrázek 17: a) Stopa částice o velikosti 1 μm okolo prvních dvou trubek v radiační části; b) Stopa částice o velikosti 33 μm okolo prvních dvou trubek v radiační části [10].....	17
Obrázek 18: Výpočetní doména s okrajovými podmínkami [12]	18
Obrázek 19: Fotografie skutečného nánosů po 3,5 h [12].....	19
Obrázek 20: Numerická předpověď tloušťky vzniklého nánosů po 3,5 h; a) Zhou et. Al.; b) simulace A; c) simulace B; d) simulace C [12]	19
Obrázek 21: Setrvačný pohyb částic různé velikosti vycházejících z jednoho bodu [12]	20
Obrázek 22: Fotografie vzniklého nánosů blížícího se k úplnému ucpání prostoru mezi trubkami [14].....	21
Obrázek 23: Síť pro $s_t=1,75$ d, kde průměr trubky $d = 50$ mm [14].....	21
Obrázek 24: Tok mezi první a druhou trubkou ovlivněný Coanda efektem [14].....	22

Obrázek 25: Výsledný tvar nánosů, shora dolů $s_t/D=1,5$; 2,25 a 3,0, proud spalin šel zleva doprava, čas zanášení je shora dolů je 1:54; 3:10 a 5:20 (h:min) a nános je zbarven teplotou ve $^{\circ}\text{C}$ [14]	23
Obrázek 26: Schématické uspořádání trubek v kotli; (a) zjednodušený model trubek; (b) model používaný pro simulaci s výpočetní mřížkou a okrajovými podmínkami [13]	24
Obrázek 27: Rozdělení velikostí částic popela má bimodální charakteristiku [13]	24
Obrázek 28: Rychlost kontinuální fáze [13]	25
Obrázek 29: Trajektorie částic popílku o velikosti (a) $20\text{ }\mu\text{m}$ a (b) $0,2\text{ }\mu\text{m}$ [13]	25
Obrázek 30: Tvar nánosů na prvních dvou trubkách předehříváku [10]	26
Obrázek 31: Zjednodušené procesní schéma	28
Obrázek 32: Model domény s nezaneseným povrchem trubek (1) a pomocná plocha sloužící k zjemnění sítě (2)	29
Obrázek 33: Detail sítě na modelu s nezanesenými trubkami	29
Obrázek 34: Detail sítě na modelu se zanesenými trubkami	30
Obrázek 35: Průběh teploty spalin v modelu s nezanesenými trubkami v rozmezí teplot 1200-1300 K	31
Obrázek 36: Průběh teploty spalin v modelu se zanesenými trubkami v rozmezí teplot 1200-1300 K	32
Obrázek 37: Část sítě modelu trubky	33
Obrázek 38: Průběh teploty na povrchu první nezanesené trubky	34
Obrázek 39: Teplotní průběh spalin okolo první nezanesené trubky	34
Obrázek 40: Průběh teploty na povrchu první zanesené trubky	34
Obrázek 41: Teplotní průběh spalin okolo první zanesené trubky	34
Obrázek 42: Průběh teploty na povrchu druhé nezanesené trubky	35
Obrázek 43: Teplotní průběh spalin okolo druhé nezanesené trubky	35
Obrázek 44: Průběh teploty na povrchu druhé zanesené trubky	35
Obrázek 45: Teplotní průběh spalin okolo druhé zanesené trubky	35
Obrázek 46: Průběh teploty na povrchu třetí nezanesené trubky	36
Obrázek 47: Teplotní průběh spalin okolo třetí nezanesené trubky	36
Obrázek 48: Průběh teploty na povrchu třetí zanesené trubky	36
Obrázek 49: Teplotní průběh spalin okolo třetí zanesené trubky	36
Obrázek 50: Diagram pro stanovení T_{al} [22]	39
Obrázek 51: Srovnání maximálního teplotního zatížení první nezanesené a zanesené trubky	40

Obrázek 52: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení první nezanesené trubky v závislosti na jejím obvodu	40
Obrázek 53: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení první zanesené trubky v závislosti na jejím obvodu	40
Obrázek 54: Porovnání maximálních teplot a odhadované životnosti pro první nezanesenou a zanesenou trubku	41
Obrázek 55: Srovnání maximálního teplotního zatížení druhé nezanesené a zanesené trubky ..	41
Obrázek 56: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení druhé nezanesené trubky v závislosti na jejím obvodu	42
Obrázek 57: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení druhé zanesené trubky v závislosti na jejím obvodu	42
Obrázek 58: Porovnání maximálních teplot a odhadované životnosti pro druhou nezanesenou a zanesenou trubku	43
Obrázek 59: Srovnání maximálního teplotního zatížení třetí nezanesené a zanesené trubky ..	43
Obrázek 60: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení třetí nezanesené trubky v závislosti na jejím obvodu	44
Obrázek 61: Zobrazení životnosti a teplotního zatížení třetí zanesené trubky v závislosti na jejím obvodu	44
Obrázek 62: Porovnání maximálních teplot a odhadované životnosti pro třetí nezanesenou a zanesenou trubku	44
Obrázek 63: Graf zobrazující průběhy tepelných zatížení po obvodu první nezanesené a zanesené trubky a jejich průměrné hodnoty	46
Obrázek 64: Graf zobrazující průběhy tepelných zatížení po obvodu druhé nezanesené a zanesené trubky a jejich průměrné hodnoty	47
Obrázek 65: Graf zobrazující průběhy tepelných výkonů po obvodu třetí nezanesené a zanesené trubky a jejich průměrné hodnoty	48
Obrázek 66: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu první nezanesené trubky	60
Obrázek 67: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu první zanesené trubky	60
Obrázek 68: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu druhé nezanesené trubky	61
Obrázek 69: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu druhé zanesené trubky	61
Obrázek 70: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu třetí nezanesené trubky	62
Obrázek 71: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu třetí zanesené trubky	62
Obrázek 72: Hodnoty „Aspect ratio“	64
Obrázek 73: Hodnoty „Skewness“	64
Obrázek 74: Pomocná tabulka pro převod „body“ na „mesh element“	66
Obrázek 75: Pomocná tabulka pro převod „materiálu“ na „mesh element“	66

Obrázek 76: Pomocná tabulka pro převod „edge“ na „mesh	66
Obrázek 77: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti první nezanesené trubky.....	68
Obrázek 78: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti první zanesené trubky.....	68
Obrázek 79: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti druhé nezanesené trubky.....	69
Obrázek 80: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti druhé zanesené trubky.....	69
Obrázek 81: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti třetí nezanesené trubky.....	70
Obrázek 82: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti třetí zanesené trubky.....	70

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
17341	-	Nezanesená trubka z materiálu 17341
$17341+nános$	-	Zanesená trubka z materiálu 17341
b	mm	Posunutí
d	mm	Průměr trubky
d_{ms}	mm	Střední průměr stěny
e_{ms}	mm	Střední tloušťka stěny hlavního tělesa
f_{op}	MPa	Membránové napětí při provozních podmínkách
k	mm	Směrnice přímky
p	MPa	Tlak v potrubí
q_{ocel}	W/mm	Tepelný výkon nezanesené trubky
$q_{ocel+nános}$	W/mm	Tepelný výkon zanesené trubky
$q_{ocel,AVG}$	W/mm	Průměrný tepelný výkon nezanesené trubky
$q_{ocel+nános,AVG}$	W/mm	Průměrný tepelný výkon zanesené trubky
$R_{m,t1}$	MPa	Mez pevnosti při teplotě t_1
$R_{m,t2}$	MPa	Mez pevnosti při teplotě t_2
$R_{mt}/10^4$	MPa	Mez pevnosti při dané teplotě v čase 10^4 h
$R_{mt}/10^5$	MPa	Mez pevnosti při dané teplotě v čase 10^5 h
$R_{mt}/2 \cdot 10^5$	MPa	Mez pevnosti při dané teplotě v čase $2 \cdot 10^5$ h
$R_{m/top}$	MPa	Mez pevnosti při provozních podmínkách
$R_{m/T/t1}$	MPa	Mez pevnosti v daném čase a teplotě t_1
$R_{m/T/t2}$	MPa	Mez pevnosti v daném čase a teplotě t_2
$R_{m/T/tc}$	MPa	Mez pevnosti v daném čase a teplotě tečení
s_t	mm	Vzdálenosti trubek
s_l/d	mm	Poměr vertikální vzdálenosti trubek k jejich průměru

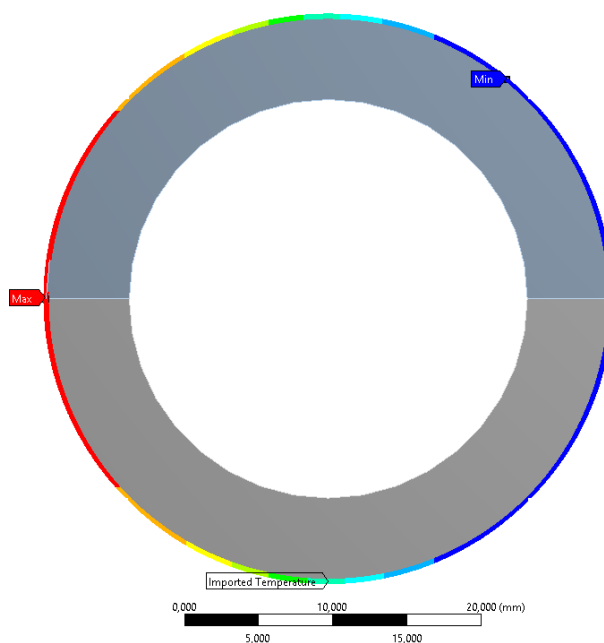
s_2/d	mm	Poměr horizontální vzdálenosti trubek k jejich průměru
t_1	°C	Nižší teplota z daného intervalu
t_2	°C	Vyšší teplota z daného intervalu
t_c	K	Maximální dosažená teplota na povrchu trubky
T_{ocel}	K	Teplota na povrchu nezanesené trubky
$T_{ocel+nános}$	K	Teplota na povrchu zanesené trubky
T_{al}	h	Teoretický doba života
Φ	°	Obvod trubek

Příloha A

Rozložení teploty na vnějším povrchu trubek

B: Steady-State Thermal
 Imported Temperature
 Time: 1, s
 Unit: K
 21.05.2018 22:59

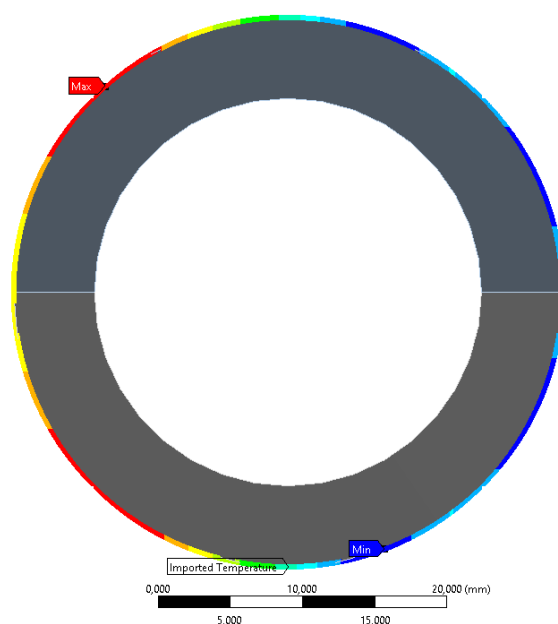
894,301 Max
 886,122
 877,943
 869,764
 861,585
 853,407
 845,228
 837,049
 828,87
 820,692 Min



Obrázek 66: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu první nezanesené trubky

B: Steady-State Thermal
 Imported Temperature
 Time: 1, s
 Unit: K
 21.05.2018 23:01

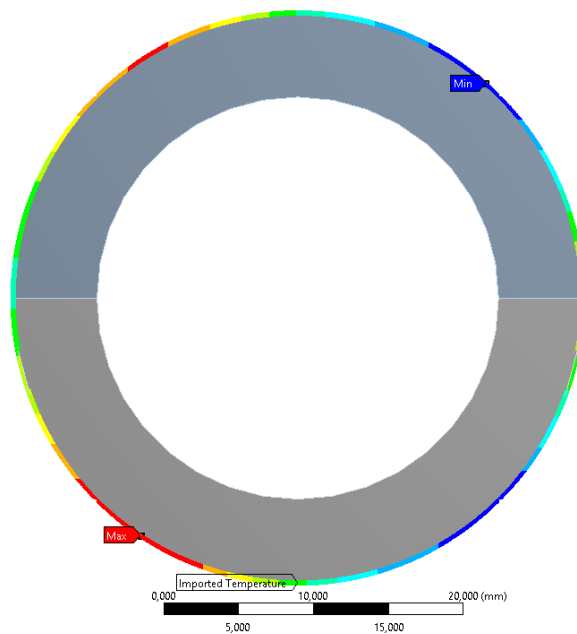
827,5 Max
 825,989
 824,477
 822,965
 821,454
 819,942
 818,43
 816,919
 815,407
 813,896 Min



Obrázek 67: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu první zanesené trubky

B: Steady-State Thermal
 Imported Temperature
 Time: 1, s
 Unit: K
 21.05.2018 22:58

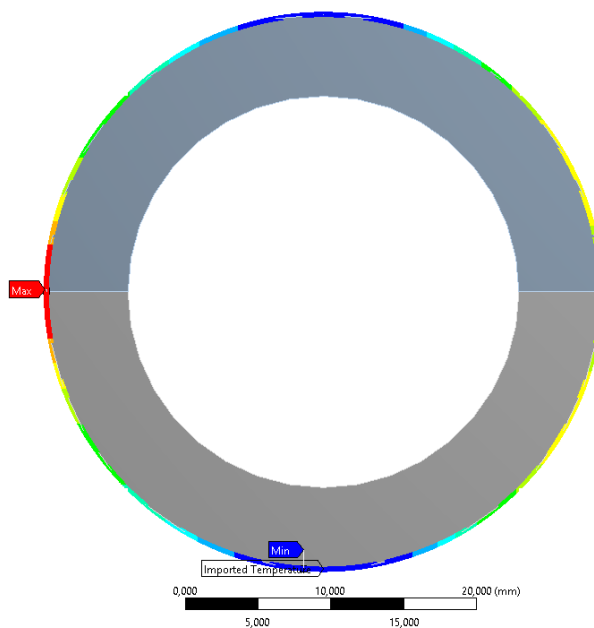
855.56 Max
 852.094
 848.628
 845.162
 841.696
 838.231
 834.765
 831.299
 827.833
 824.367 Min



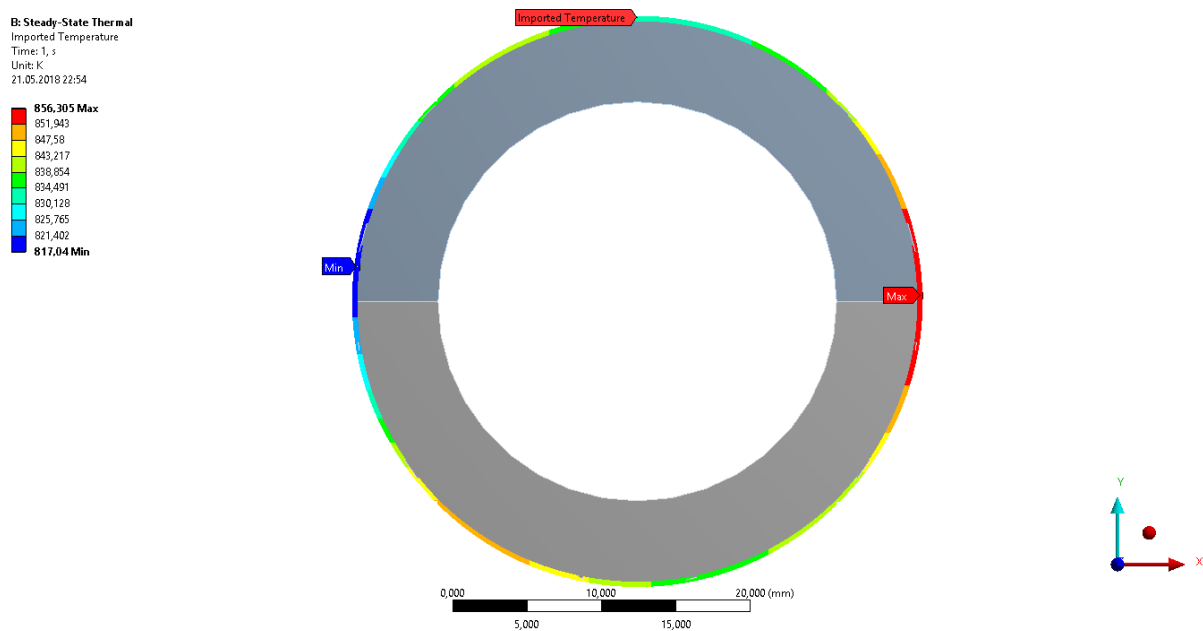
Obrázek 68: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu druhé nezanesené trubky

B: Steady-State Thermal
 Imported Temperature
 Time: 1, s
 Unit: K
 21.05.2018 23:00

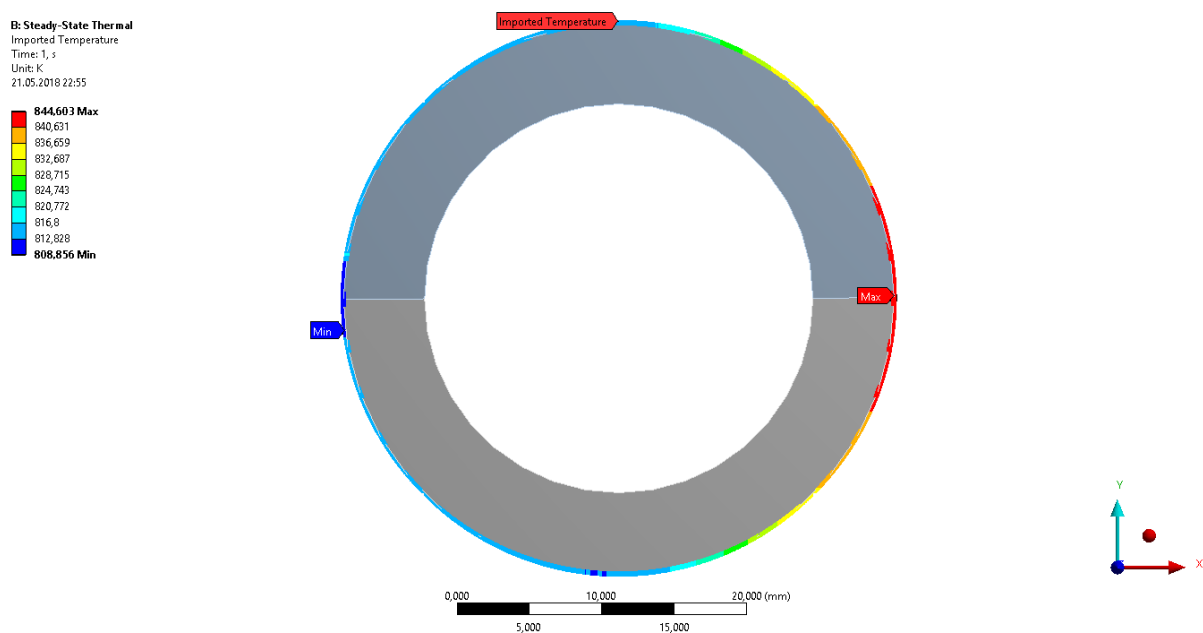
826.493 Max
 824.518
 822.544
 820.569
 818.594
 816.62
 814.645
 812.67
 810.696
 808.721 Min



Obrázek 69: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu druhé zanesené trubky



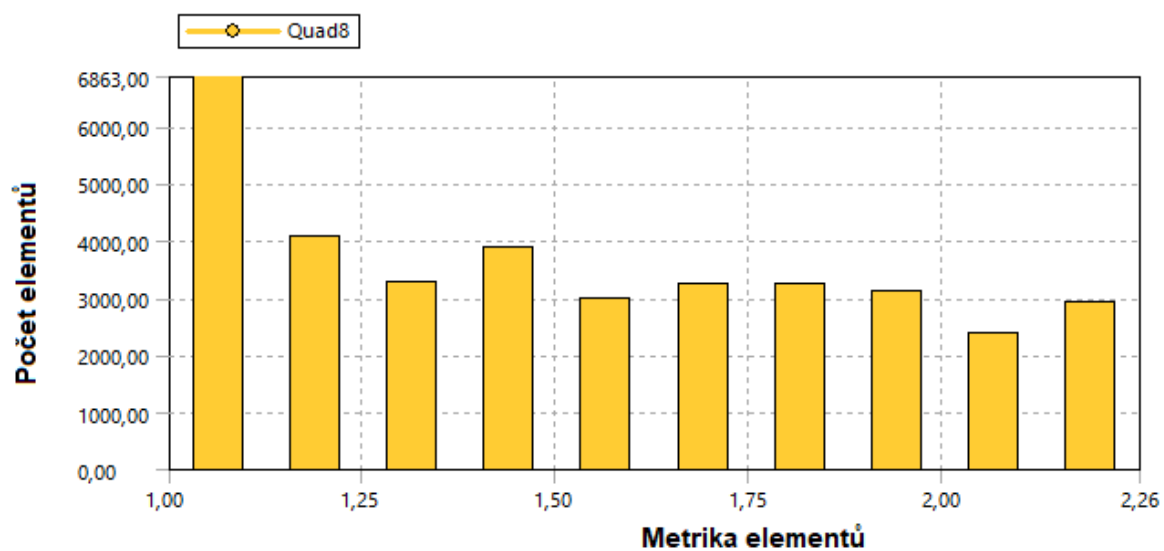
Obrázek 70: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu třetí nezanesené trubky



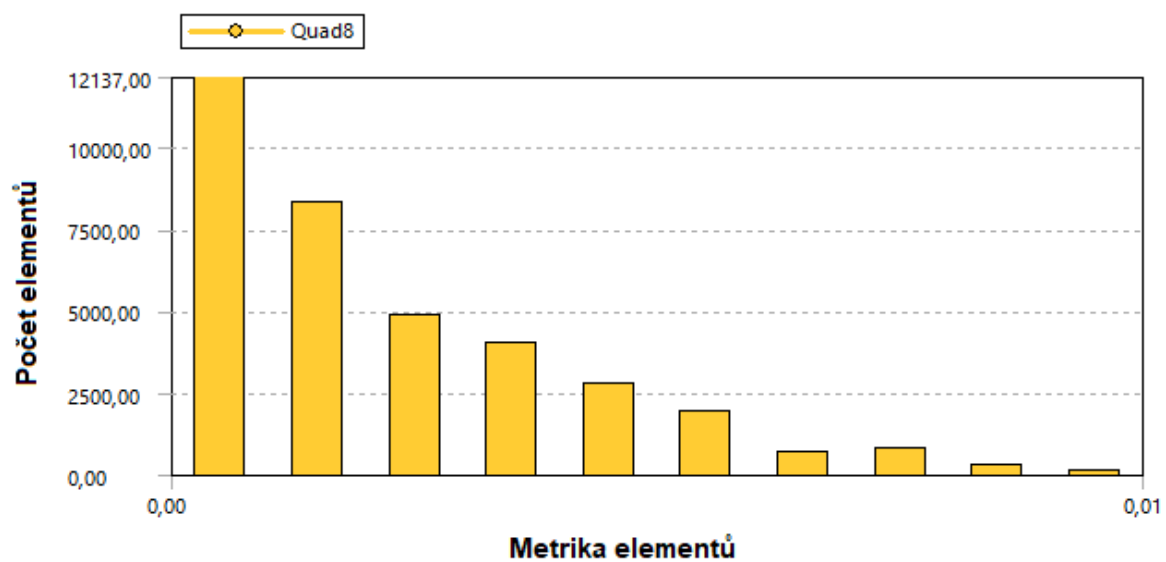
Obrázek 71: Detailní rozložení teploty na vnějším povrchu třetí zanesené trubky

Příloha B

Grafy hodnocení kvality sítě



Obrázek 72: Hodnoty „Aspect ratio“



Obrázek 73: Hodnoty „Skewness“

Příloha C

Pomocné tabulky pro exportování teplotních průběhů a tepelných toků
na řezu jednotlivých trubek

	Action	Entity Type	Criterion	Operator	Units	Value	Lower Bound	Upper Bound	Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/>	Add	Body	Named Selection	Equal	N/A	A_ocel	N/A	N/A	N/A
<input checked="" type="checkbox"/>	Convert To	Mesh Element	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Obrázek 74: Pomocná tabulka pro převod „body“ na „mesh element“

	Action	Entity Type	Criterion	Operator	Units	Value	Lower Bound	Upper Bound	Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/>	Add	Body	Material	Equal	N/A	Structural Steel	N/A	N/A	N/A
<input checked="" type="checkbox"/>	Convert To	Mesh Element	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

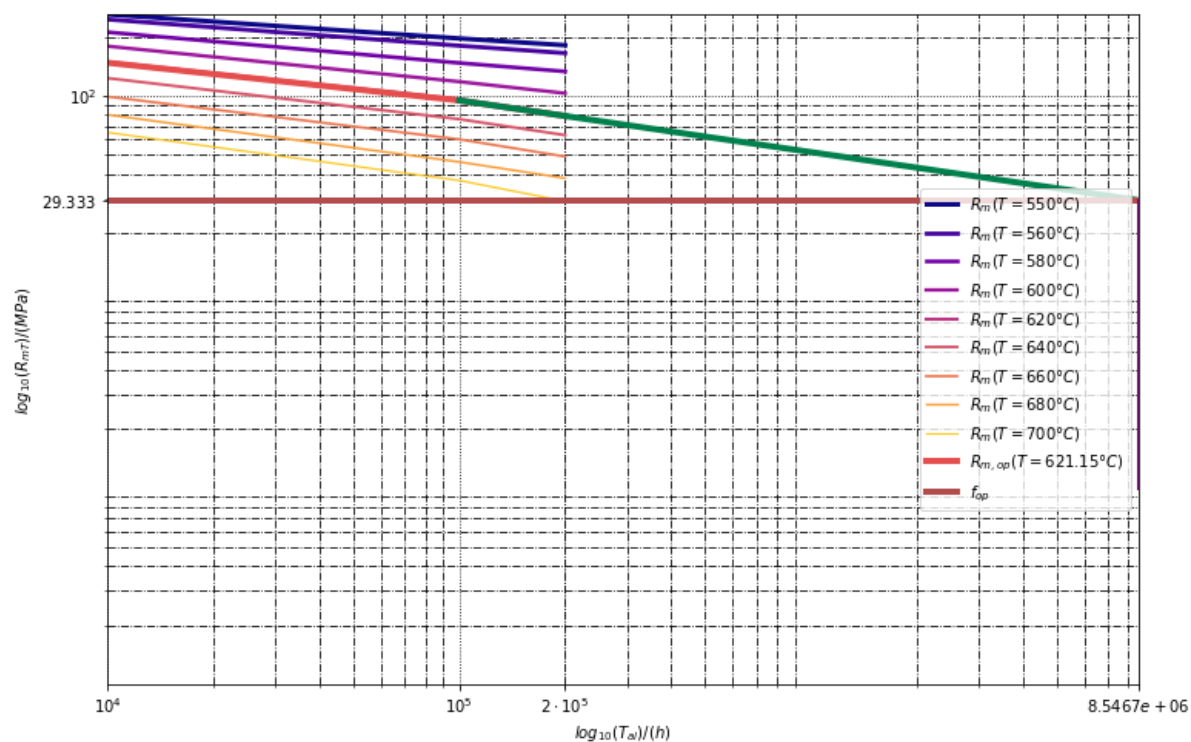
Obrázek 75: Pomocná tabulka pro převod „materiálu“ na „mesh element“

	Action	Entity Type	Criterion	Operator	Units	Value	Lower Bound	Upper Bound	Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/>	Add	Edge	Named Selection	Equal	N/A	E_hr	N/A	N/A	N/A
<input checked="" type="checkbox"/>	Convert To	Mesh Node	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

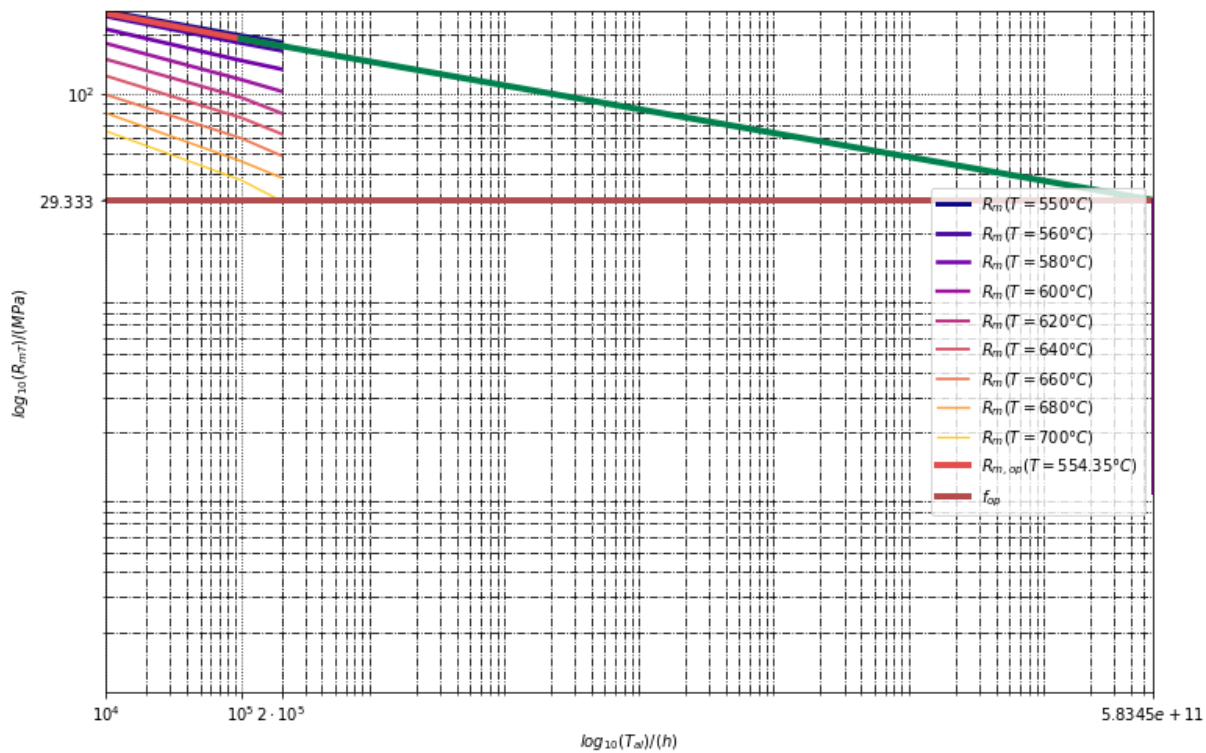
Obrázek 76: Pomocná tabulka pro převod „edge“ na „mesh

Příloha D

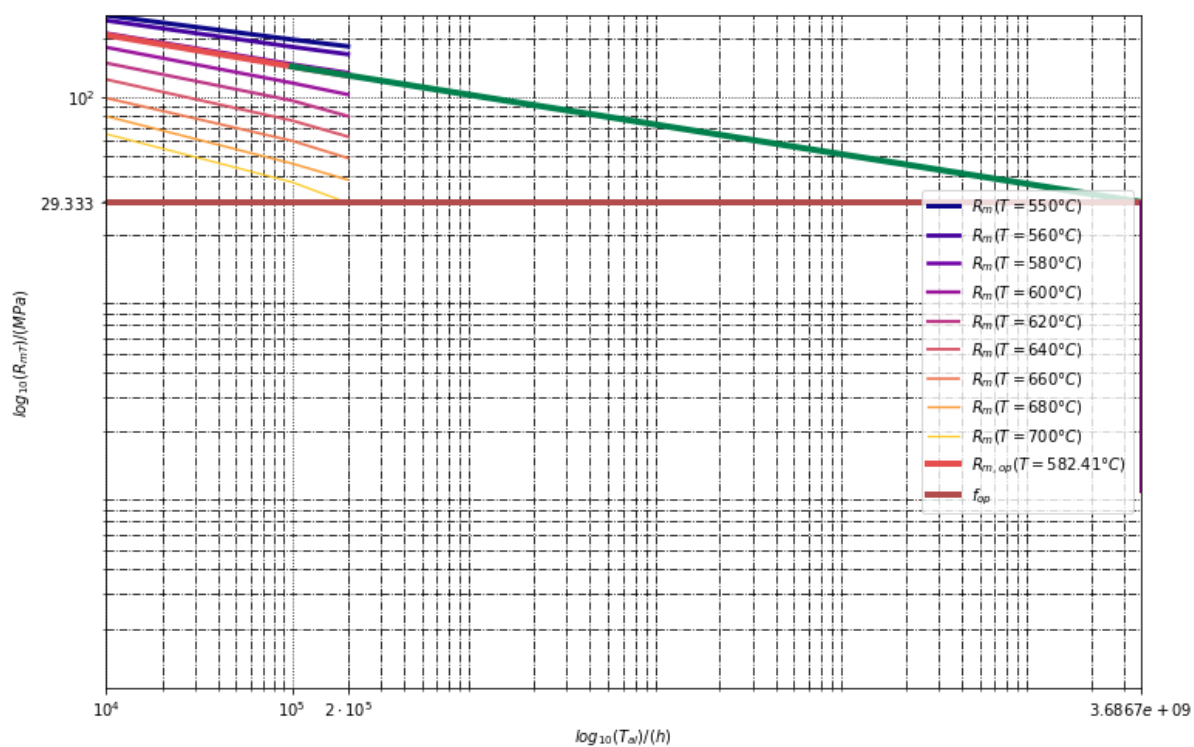
Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivky životnosti jednotlivých trubek



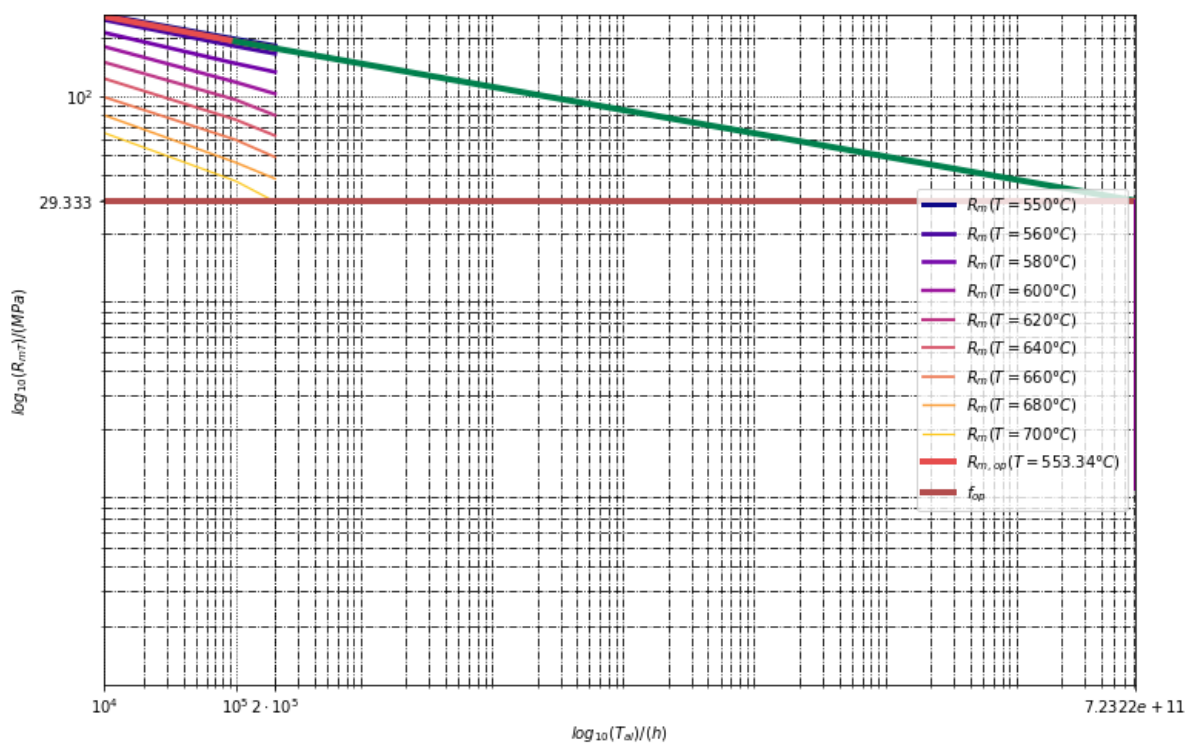
Obrázek 77: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti první nezanesené trubky



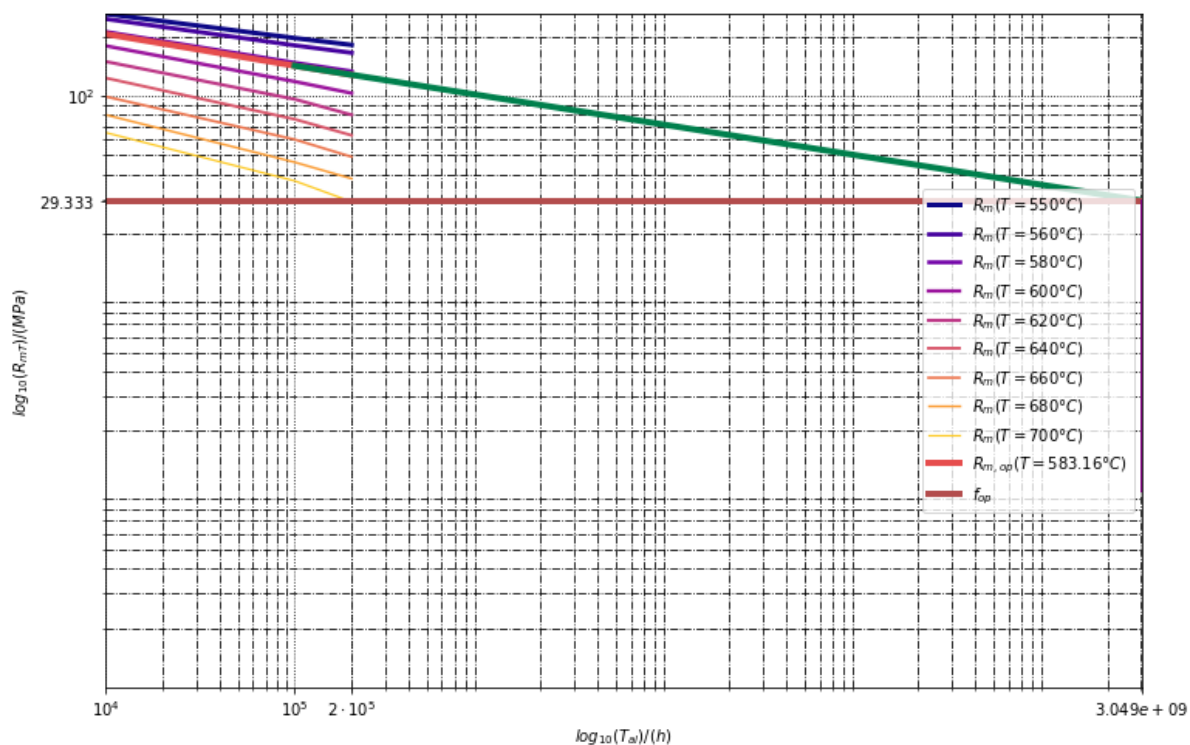
Obrázek 78: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti první zanesené trubky



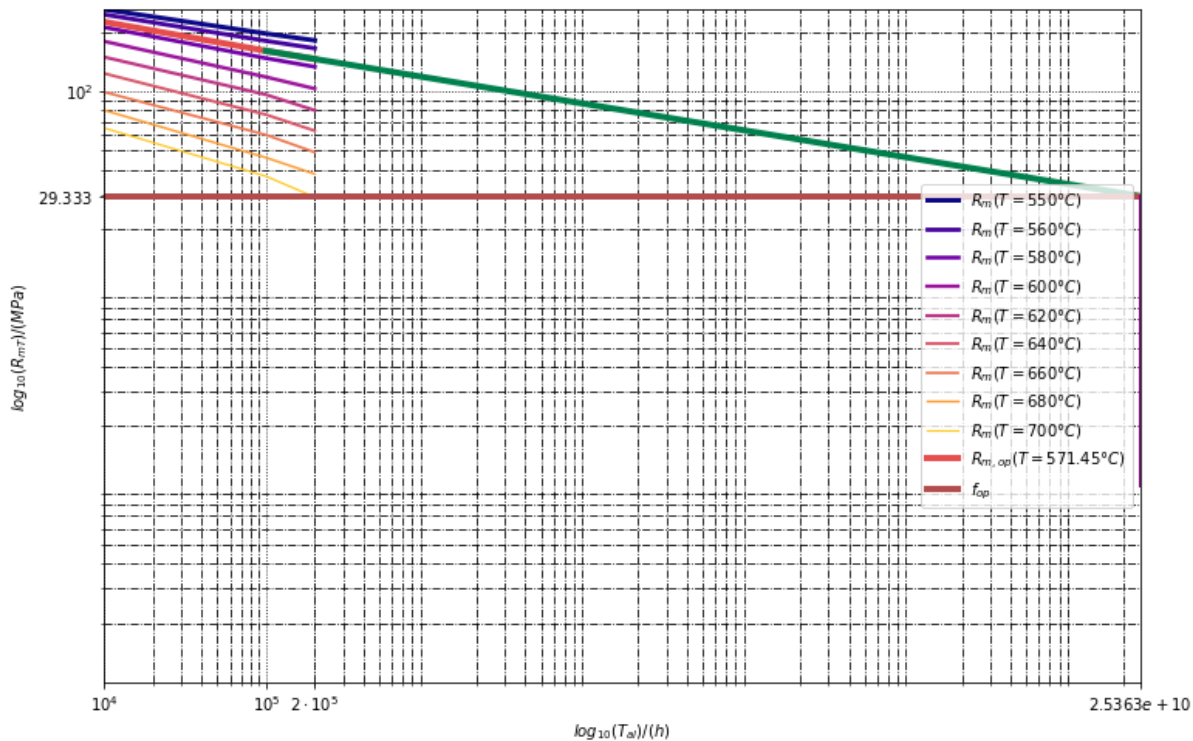
Obrázek 79: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti druhé nezanesené trubky



Obrázek 80: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti druhé zanesené trubky



Obrázek 81: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti třetí nezanesené trubky



Obrázek 82: Creepové charakteristiky materiálu 17 341 a křivka životnosti třetí zanesené trubky